

Pirkka-Pekka Kallioniemi

# **Transienttigeneraattori tuotekehitystestaukseen**

Opinnäytetyö

Kevät 2015

Tekniikan yksikkö

Tietotekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Tietotekniikan koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Sulautetut järjestelmät

Tekijä: Pirkka-Pekka Kallioniemi

Työn nimi: Transienttigeneraattori tuotekehitystestaukseen

Ohjaaja: Seppo Stenberg

Vuosi: 2015

Sivumäärä: 93

Liitteiden lukumäärä: 1

---

Tämän työn tarkoituksena on tutustua jännite- ja virtahäiriöihin, jotka tunnetaan elektroniikassa transientteina eli jännite- ja virtapiikkeinä. Työn tarkoituksena on pohtia, kuinka transientteja voidaan tuottaa keinotekoisesti testaustarkoitukseen. Työssä tutustutaan positiivisen transientin tuottavan transienttigeneraattorin suunnitteluun, mikä on tarkoitettu tuotekehityksen testaustarpeisiin.

Aluksi tutustutaan alan standardiin, jossa määritellään tarkemmin testaukseen liittyviä vaatimuksia. Työssä tarkastellaan, miten standardi määrittelee transientin ja kuinka sitä käytetään testauksessa. Lisäksi määritellään tässä työssä toteutettavan transienttigeneraattorin toiminnallisia rajoja.

Seuraavaksi tutustutaan transienttigeneraattorin piiriteoriaan eli kuinka generaattori voitaisiin toteuttaa. Tämän tarkoituksena on antaa pohja generaattorin suunnittelulle, jonka jälkeen voidaan aloittaa kytkennän suunnittelu ja simulointi.

Simuloinnissa käydään kytkennän toimintaa läpi teorian pohjalta ja testataan pitävätkö teorialaskelmat paikkansa. Simulointi antaa kytkennän toteutukselle hyvän suunnan, ja sen perusteella voidaan arvioida mahdollisia parannuksia ja jatkokehitystä kytkentään. Simuloinnista saadaan valmiudet ja vertailutuloksia toteutettavan kytkennän testaamiseksi.

Kytkenän toteutuksessa käydään läpi kytkentään tarvittavia komponentteja, niiden sähköisen toiminnan testaamista ja kytkennän rakentamista sekä testaamista. Tässä vaiheessa saatujen tulosten perusteella voidaan pohtia mahdollisia muutoksia ja parannuksia kytkentään, mille lasketaan uusi teoria. Lisäksi tehdään simulointi ja käytännön testausta. Toimivaksi todetulle kytkennälle suunnitellaan piirilevy, jonka jälkeen sille tehdään toiminnallinen testaus, jotta voidaan todeta myös piirilevyn ja kytkennän toiminta hyväksi.

Työn tavoitteena on saada mahdollisimman hyvin toimiva positiivisen jännitetransientin tuottava transienttigeneraattorikytkentä, joka toimii määrittelyn mukaisesti.

Avainsanat: Transientti, testaus, EMC, EFT/B, jännitepiikki, virtapiikki.

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Information Technology

Specialisation: Embedded Systems

Author: Pirkka-Pekka Kallioniemi

Title of thesis: Transient generator for research & development testing

Supervisor: Seppo Stenberg

Year: 2015

Number of pages: 93

Number of appendices: 1

---

The purpose of this thesis was to demonstrate voltage and current disturbances, which are commonly known in the field of electronics as transient spikes. The purpose of this was to consider how transients can be produced artificially for testing purposes. This thesis examined the developing of a transient generator, which produces positive transient spikes. The transient generator was intended to fulfil the needs of R & D testing.

At first this thesis introduces the standard, which was used to discover the requirements of electrical fast transient burst immunity testing. The thesis examines how the standard defines transient and how it is used for testing.

Next this thesis introduces the transient generator circuit theory and how the generator could be implemented. After this the circuit theory will be verified by circuit simulation software. The circuit simulator gives a good base for circuit implementing.

In the implementation of the circuit it was studied how the chosen components operate and are they suitable to be used in this circuit. Also a proto circuit was tested to see if there were any errors in the circuit operations and what changes had to be made in the circuit. As soon as it is certain that the circuit works as well as possible, it is possible to start the development of the circuit board.

Keywords: Transient, testing, EMC, EFT/B, voltage spike, current spike

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	9
1 Johdanto .....	10
1.1 Työn tausta .....	10
1.2 Työn tavoite .....	10
1.3 Työn rakenne .....	10
1.4 Epec Oy .....	11
2 Transientti virtapiirissä .....	12
2.1 Transienttien aiheuttajat.....	13
2.1.1 Kelapiiri .....	13
2.1.2 Kondensaattori.....	14
2.1.3 Väärä kaapelointi .....	15
2.2 EMC .....	17
3 Testausstandardi .....	18
3.1 Purskeen määrittely .....	18
3.2 Yksittäisen pulssin muoto.....	21
3.3 EFT/B-generaattorin peruskytkentä .....	22
3.4 Testausympäristö ja -välineet .....	24
3.4.1 Teholähdekytkentä.....	24
3.4.2 Signaalikeytyminen.....	25
3.4.3 Testausympäristö.....	26
4 Käytetyt menetelmät .....	27
4.1 Transienttigeneraattorin suunnittelu .....	27
4.2 Transienttigeneraattorin simulointi .....	28
4.3 Käytännön testaus .....	28
5 Vaatimukset .....	30

5.1 Käyttökohteen määrittely .....	30
5.2 Toiminnallisia vaatimuksia .....	30
5.3 Turvallisuus .....	31
6 Piiriteoria .....	32
6.1 Laitteen lohkokaavio .....	32
6.2 Liipaisu .....	33
6.3 Pulssimuuntaja .....	36
6.4 Energiavarastokondensaattori .....	36
6.5 Suodatus .....	42
6.6 Teholähde .....	44
7 Kytkenän simulointi .....	46
7.2 Ohjaus .....	48
7.3 Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattori .....	48
7.4 Pulssimuuntajan simulointi .....	49
7.5 Suurjännite energiavarastokondensaattori .....	51
7.6 Liipaisun simulointi .....	53
7.7 Pulssinmuotoilu .....	56
7.8 Koko kytkennän toiminnallinen simulointi .....	59
8 Kytkenän toteutus .....	66
8.1 Komponenttivalinnat .....	66
8.1.1 Mosfet-transistori .....	67
8.1.2 Pulssimuuntaja .....	68
8.2 Komponenttien testaus .....	69
8.3 Kokeilukytkenän testaus .....	69
8.3.1 Toiminnallisia mittauksia .....	69
8.3.2 Parannuksia kytkentään .....	80
8.4 Piirilevyn suunnittelu .....	82
8.5 Kokonaisuuden testaus .....	82
9 Koekytkenän tuloksia .....	83
10 POHDINTAA JA YHTEENVETO .....	90
LÄHTEET .....	91
LIITTEET .....	93

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Positiivinen ja negatiivinen jännitetransientin esiintyminen tasajännitteessä .....	12
Kuvio 2. Kelapiiri .....	14
Kuvio 3. Kondensaattoriipiiri .....	15
Kuvio 4. Kapasitiivinen kytketyminen .....	16
Kuvio 5. Induktiivinen kytketyminen .....	16
Kuvio 6. EMC:ssa testattavat häiriöt .....	17
Kuvio 7. Purskeen taajuus .....	18
Kuvio 8. Purskeen toistoväli .....	19
Kuvio 9. Yksittäisen pulssinmuoto .....	21
Kuvio 10. Pulssin nousureuna .....	22
Kuvio 11. Standardin esittämä periaate kytkennästä .....	23
Kuvio 12. Generaattorin liittäminen testattavan laitteen teholähdeliitäntään .....	24
Kuvio 13. Signaalikaapeleiden kapasitiivinen kytkentä .....	25
Kuvio 14. Yleiskuva testausympäristön asettelusta .....	26
Kuvio 15. Kytkennän perusta .....	32
Kuvio 16. Laitteen lohkokaavio .....	33
Kuvio 17. Mosfetin hilaan vaikuttavat hajakapasitanssit .....	34
Kuvio 18. Mosfetin ohjaus johtavaan tilaan .....	35
Kuvio 19. Kondensaattorin latauspiiri .....	37
Kuvio 20. Energiavarastokondensaattorin latausaika .....	39
Kuvio 21. Energiavarastokondensaattorin purkausaika .....	40
Kuvio 22. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattorin latausaika .....	41
Kuvio 23. Suodatinkytkenä .....	42
Kuvio 24. Suodatinkytkenä aiheuttama jännitteen muutos ajan funktiossa, energiavarastokondensaattorin purkautumisessa .....	44
Kuvio 25. Teholähde jännitteen nostamiseksi .....	45
Kuvio 26. Kytkennän simulointinäkymä LTSpice-ohjelmassa .....	46
Kuvio 27. Kytkennän jakaminen osiin simulointia varten .....	47
Kuvio 28. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattori .....	48

Kuvio 29. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattorin latautuminen ja purkautuminen .....	49
Kuvio 30. Pulssimuuntajan simulointikytkentä.....	50
Kuvio 31. Pulssimuuntajan simulointi .....	51
Kuvio 32. Suurjännite energiavarastokondensaattorin latausvastuksen simulointikytkentä.....	52
Kuvio 33. Energiavarastokondensaattorin latautuminen ja purkautuminen.....	53
Kuvio 34. Pulssin nousureunan simulointikytkentä .....	54
Kuvio 35. Nousureunan simulointimittaus .....	55
Kuvio 36. Nopeamman nousureunan simulointimittaus .....	55
Kuvio 37. Pulssinmuotoilukytkentä.....	56
Kuvio 38. Pulssinmuotoilun simulointimittaus.....	57
Kuvio 39. Paranneltu pulssinmuotoilukytkentä.....	58
Kuvio 40. Parannellun pulssinmuotoilukytkennän simulointimittaus.....	59
Kuvio 41. Kokokytkennän simulointi.....	60
Kuvio 42. 5 kHz:n purske .....	61
Kuvio 43. 100 kHz:n purske .....	61
Kuvio 44. Yksittäinen pulssi ilman kuormaa .....	62
Kuvio 45. Yksittäinen pulssi 1000 $\Omega$ :n kuormalla .....	63
Kuvio 46. Yksittäinen pulssi 50 $\Omega$ :n kuormalla .....	64
Kuvio 47. Virtapulssi oikosulkusimuloinnissa .....	64
Kuvio 48. Hilakapasitanssin varaustarve .....	68
Kuvio 49. Pulssin nousureuna ja leveys 20 voltilla.....	70
Kuvio 50. Pulssin nousureuna ja leveys 40 voltilla.....	71
Kuvio 51. Pulssin nousureuna ja leveys 60 voltilla.....	72
Kuvio 52. Virta 1 k $\Omega$ :n kuormalla.....	73
Kuvio 53. Pulssin nousureuna ja leveys 80 voltilla.....	74
Kuvio 54. Pulssin nousureuna ja leveys 100 voltilla.....	75
Kuvio 55. Kokonaiskuva mitattavasta pulssista 100 voltilla.....	76
Kuvio 56. Kokonaiskuva mitattavasta pulssista 120 voltilla.....	77
Kuvio 57. Pulssin nousureuna ja leveys 120 voltilla.....	78
Kuvio 58. Oikosulkumittaus 120 voltilla .....	79
Kuvio 59. Kokonaiskuva oikosulkumittauksen virtapulssista .....	80

Kuvio 60. Latauksen ohjaus .....	81
Kuvio 61. Mosfetin suojadiodit .....	83
Kuvio 62. Nousureunan nopeus 120 voltilla .....	84
Kuvio 63. Pulssinleveys 120 voltilla ja 1 k $\Omega$ :n kuormalla.....	85
Kuvio 64. Pulssinleveys 120 voltilla ja 47 $\Omega$ :n kuormalla .....	86
Kuvio 65. Pulssin oikosulkuvirta 120 voltilla .....	87
Kuvio 66. Pulssimittaus 120 voltilla ilman kuormaa.....	88
Kuvio 67. Kytkenän ohjaus signaaligeneraattorilla 5 kHz.....	89

Taulukko 1. Testaustasot .....	19
Taulukko 2. Jännitteen huippuarvot ja toistotaajuuudet kalibroinnissa.....	20



## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>EFT/B</b>	Electrical fast transient/burst, nopea transienttipurske.
<b>EMC</b>	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus.
<b>ESD</b>	Electrostatic discharge, sähköstaattinen purkaus.
<b>MOSFET</b>	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor, metallioksidikanavatransistori.
<b>Purske</b>	Tietynajan sisällä esiintyy useita samanlaisia jännitepiikkejä.
<b>Surge</b>	Hetkellinen jännitteen tai virran kasvu, syöksyjännite

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Epec Oy valmistaa älykkäitä ohjausyksiköitä liikkuviin työkoneisiin. Tuotteiden jatkuvan laadun parantamisen takia yrityksessä on tarvetta transienttigeneraattorille. Tuotteiden transienttisuojauksien kestävyyttä on tarpeen esitestata ennen virallisia testejä, jolloin voidaan varmistaa niiden riittävä kestävyys. Yrityksellä ei ole ollut ennestään työkalua suojausten kestävyys testaukseen, tätä tarkoitusta varten on päätetty rakentaa oma testaustyökalu. Työkalu määritellään yrityksen tuotteita varten sopivaksi, jotta voidaan mahdollistaa tuotteiden kestävyys testaus jo ennen ongelmien esiintymistä. Näin voidaan varmistaa jatkossa entistä laadukkaampien tuotteiden valmistus.

## 1.2 Työn tavoite

Tavoitteena on selvittää perusta toteutettavalle transienttigeneraattorille, jolla saadaan testattua Epec-ohjausyksiköiden tulojen ja lähtöjen transienttipiikin kesto. Generaattorilla pitää pystyä tekemään toistuvia testejä, joissa jokaisen transientin amplitudi on sama. Lisäksi generaattorilla pitää pystyä tuottamaan yksittäisiä piikkejä sekä useita piikkejä sarjassa. Amplitudin säätäminen riittävän tarkasti suuremmaksi ja pienemmäksi on tarpeen. Laitteelle määritellään toiminnalliset vaatimukset, jotka yritetään täyttää tässä työssä.

## 1.3 Työn rakenne

Työssä tullaan käsittelemään teoriaa transientista ja standardista, jossa määritellään elektroniikkateollisuudessa valmistettavien tuotteiden häiriönsietotestausta, sekä teoriaa toteutettavasta kytkennästä. Kun kytkennälle on tehty teoriapohja, niin kytkennän suunnittelu aloitetaan simulointi-ohjelmalla, jolla testataan kytkentäteoriaa. Käytännön osuudessa käydään läpi komponentteja, joita olisi tarkoitus

käyttää, sekä käydään läpi laitteen kytkennän ja piirilevyn suunnittelua, sekä näiden testaamista ja toteutusta.

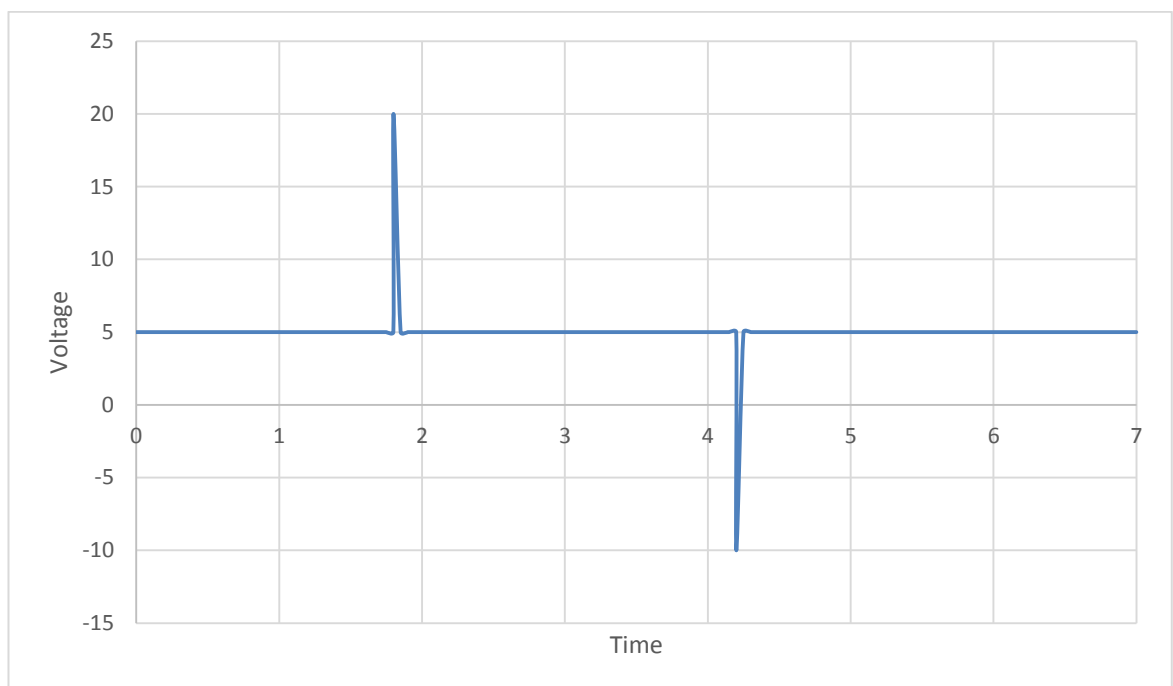
#### **1.4 Epec Oy**

Epec Oy on perustettu Seinäjoella 1978 nimellä E-P Elektroniikka, nimi vaihdettiin Epec Oy:ksi kansainvälistymisen seurauksena. Yritys on erikoistunut liikkuvien työkonoiden älykkäiden koneenohjausjärjestelmien ratkaisutoimittajaksi. Epec Oy:n toimipisteellä Seinäjoella sijaitsee tuotekehitys, projektipalvelut, asiakastuki, sekä elektroniikkatuotanto. Epec valmistaa liikkuviin työkonoihin useita erilaisia ohjaus- ja näyttöyksiköitä, jotka liitetään toisiinsa CAN-väylällä. Epec Oy toimii usealla koneenvalmistusalueella ohjausjärjestelmä toimittajana, kuten yhdyskunta-, maatalous-, kaivos-, maanrakennus- ja metsäsektorilla. Ponsse Oyj osti Epec Oy:n toiminnot vuonna 2004, mistä lähtien Epec on toiminut Ponsse-konsernin itsenäisenä tytäryhtiönä. Vuonna 2012 Epec avasi uuden asiakastukikonttorin Kiinaan, jotta Aasian markkina-alueen asiakkaille voidaan tarjota paremmin palveluja, kuten tukea ja koulutusta. (Epec 2013.)

## 2 Transientti virtapiirissä

Transientti on nopea muutos jännitteessä tai virrassa, yleisesti puhutaan jännite- tai virtapiikistä (Pohjalainen 1999, 1043 - 1044).

Transientteja voi esiintyä pulssinkestoltaan kymmenistä nanosekunneista aina useisiin mikrosekunteihin asti. Nopeimpia, eli pulssinkestoltaan kymmenissä nanosekunneissa olevia transienttipiikkejä kutsutaan nopeiksi transienteiksi (EFT). Hitaampia kutsutaan syöksyjännitteiksi (surge transient), näiden pulssin kesto voi olla muutamasta kymmenestä mikrosekunnista aina useisiin satoihin mikrosekunteihin. Nopeiden transienttien energia on huomattavasti pienempi kuin syöksyjännitteissä. Kumpikin transientti voi olla, joko positiivinen jännite- ja/tai virtapiikki tai negatiivinen jännite- ja/tai virtapiikki. (Picard 2006, 2.)



Kuvio 1. Positiivinen ja negatiivinen jännitetransientin esiintyminen tasajännitteessä

Tasajännitteessä jännitetransientti näkyy nopeana jännitteen nousuna tai laskuna. Näin nopeita muutoksia ei voi havaita yleismittarilla, vaan niiden havaitsemiseksi tarvitaan nopea oskilloskooppi.

Tässä työssä tutustutaan nopeaan transienttiin testauksen kannalta, eli mitä testausstandardissa ohjeistetaan testauksessa käytettävästä transienttipulssista sekä purskeesta.

## **2.1 Transienttien aiheuttajat**

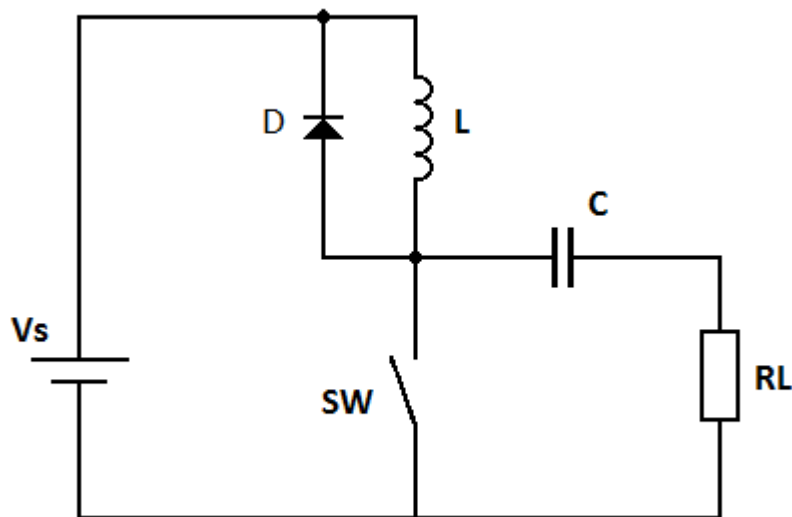
Yleisin transienttien aiheuttaja on jännitetransientti eli jännitepiikki, koska suurin osa näistä jännitepiikeistä on sähköstaattisen purkauksen muodostamia (ESD). Sähköstaattisten purkausten energia jää kuitenkin usein pieneksi, mutta korkean jännitteen takia nämä ovat erittäin vahingollisia puolijohdepiireille. Toinen luonnollinen aiheuttaja on ukkonen, koska salaman sisältämä suuri energia aiheuttaa häiriöitä jo pitkienkin matkojen päähän. (Lepkowski 2005.)

Elektronisissa piireissä huono suunnittelu tai suojakomponenttien rikkoutuminen ovat syinä piirin sisäisiin transientteihin. Esimerkiksi passiivikomponenteista kelat ja kondensaattorit voivat aiheuttaa jännite- ja virtatransientteja.

Transienttipiikki muodostuu, kun induktiivisesta virtapiiristä katkaistaan virta, keulaan varastoitunut energia purkautuu korkeana jännitepiikkinä. Vastaavasti kun kondensaattori kytketään nopeasti piiriin, niin kondensaattoriin varautunut energia purkautuu suurena virtapiikkinä. (Silvonen 2009a, 180.)

### **2.1.1 Kelapiiri**

Yksinkertainen kelapiiri voi toimia jännitetransientin aiheuttajana. Esimerkiksi kun releen kelalta katkaistaan jännite, tämä voi aiheuttaa jännitepiikin.



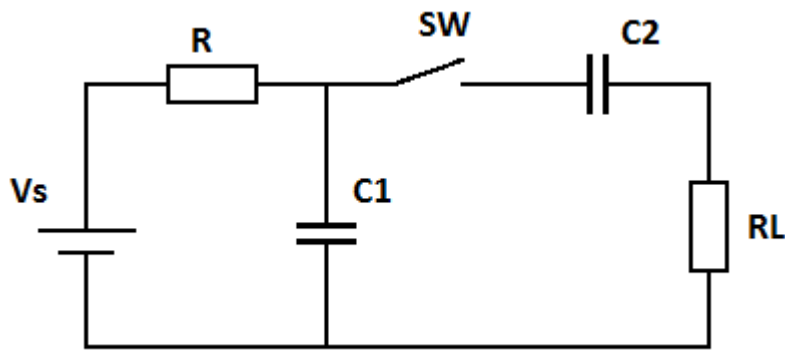
Kuvio 2. Kelapiiri

Kuviossa 2 nähdään tilanne, jos piiristä on rikkoutunut diodi (D) ja kytkin (SW) avataan, niin kela (L) aiheuttaa jännitepiikin (Silvonen 2009a, 181). Piikin amplitudi määräytyy käyttöjännitteen mukaan, lisäksi kelan induktanssilla on suuri vaikutus jännitepiikin energiaan.

Tämän kaltaiset transienttipiikit esiintyvät esimerkiksi magneettiventtiilien ohjauksissa, jossa on puutteellinen suojaus jännitepiikin muodostumista vastaan tai vaihtoehtoisesti suojaus on hajonnut.

### 2.1.2 Kondensaattoripiiri

Yksinkertainen kondensaattoripiiri voi toimia virtatransientin aiheuttajana. Esimerkiksi tehollähteessä oleva tasauskondensaattori on latautunut, kun se kytketään laitteeseen. Tämä voi aiheuttaa virtapiikin (Silvonen 2009a, 181).

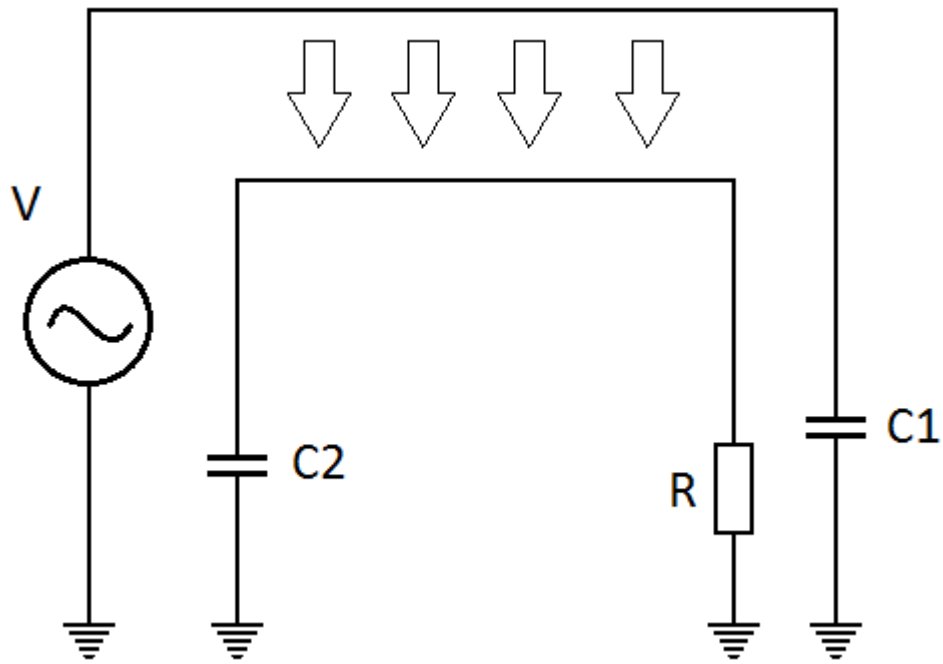


Kuvio 3. Kondensaattori

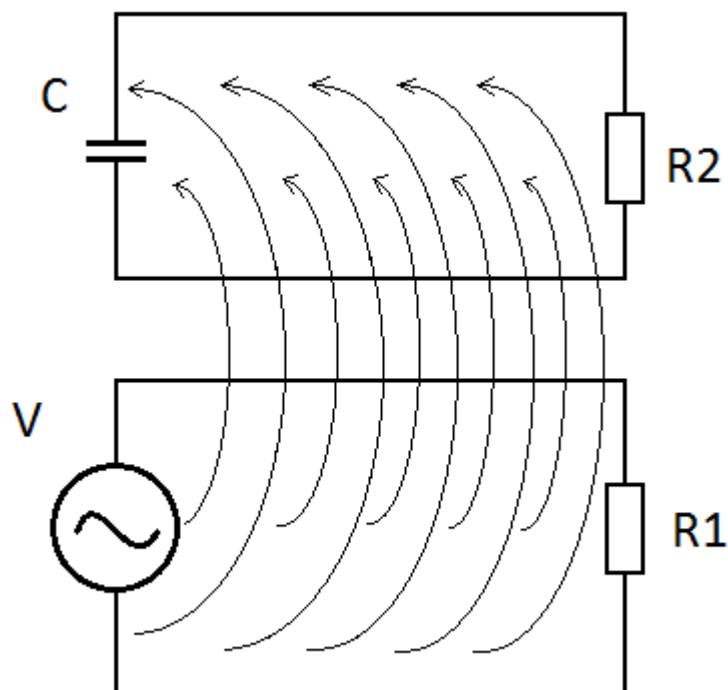
Kondensaattori muodostaa virtatransientin eli virtapiikki muodostuu, kun kytkin suljetaan nopeasti (Silvonen 2009a, 181). Energiaan vaikuttaa kondensaattorin kapasitanssi ja kuinka suurella jännitteellä kondensaattori on ladattu.

### 2.1.3 Väärä kaapelointi

Kaapeloinnissa on tärkeää ottaa huomioon kaksi eri potentiaalissa olevaa kaapelia. Kun kaapelit kulkevat rinnakkain riittävän pitkän matkan, suuremmassa potentiaalissa oleva kaapeli voi kytkeytyä kapasitiivisesti (kuvio 4) tai induktiivisesti (kuvio 5) pienemmässä potentiaalissa olevaan kaapeliin. Esimerkiksi suurjännitekaapelin viereen on asennettu signaalikaapeli. Tällöin suurjännitekaapelissa tapahtuvat jännitemuutokset voivat kapasitiivisesti tai induktiivisesti kytkeä signaalikaapeliin jännitepiikin. Tämä jännitepiikki voi rikkoa elektronisia laitteita. (Honkanen 2013a.)



Kuvio 4. Kapasitiivinen kytkeytyminen  
(Perustuu Uusitalo 2009, 10)



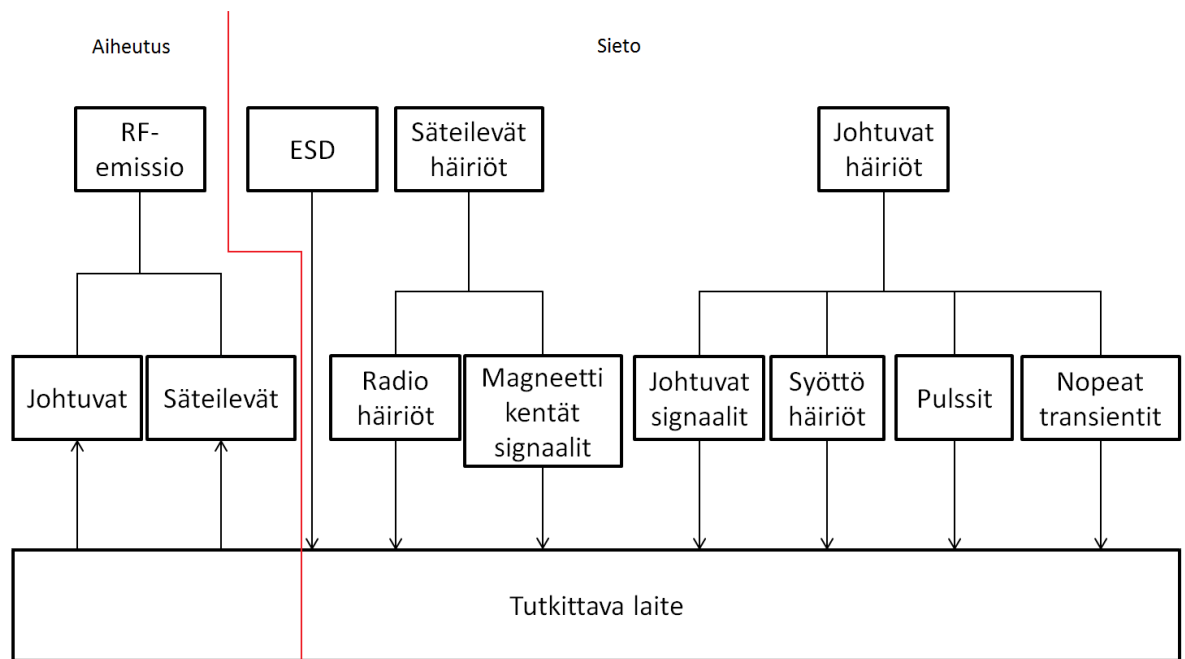
Kuvio 5. Induktiivinen kytkeytyminen  
(Perustuu Uusitalo 2009, 11)



## 2.2 EMC

Sähkömagneettinen yhteensopivuus yli rajan tarkoittaa, että laitteet voivat toimia sähkömagneettisessa ympäristössä aiheuttamatta sähkömagneettista häiriötä ja sietämällä tiedetyn määrän sähkömagneettista häiriötä (Uusitalo 2009, 8).

Standardoinnissa transienttia käsitellään kahdessa eri osiossa eli EFT/B ja surge-transienttina. Surge eli syöksyjännite (kuviossa 6 ”Pulssit”) on hidasta, noin mikro-sekunneissa tapahtuvia suurienergisiä jännite- ja virtapulsseja. Tässä työssä keskitytään EFT/B:hen, joka tarkoittaa nopeita transienttipiikkejä. Nämä ovat noin nanosekunneissa tapahtuvat yksittäiset jännitepiikit tai purskeet, joissa esiintyy useita nopeita jännitepiikkejä.



Kuvio 6. EMC:ssa testattavat häiriöt  
(Perustuu Honkanen 2013b.)

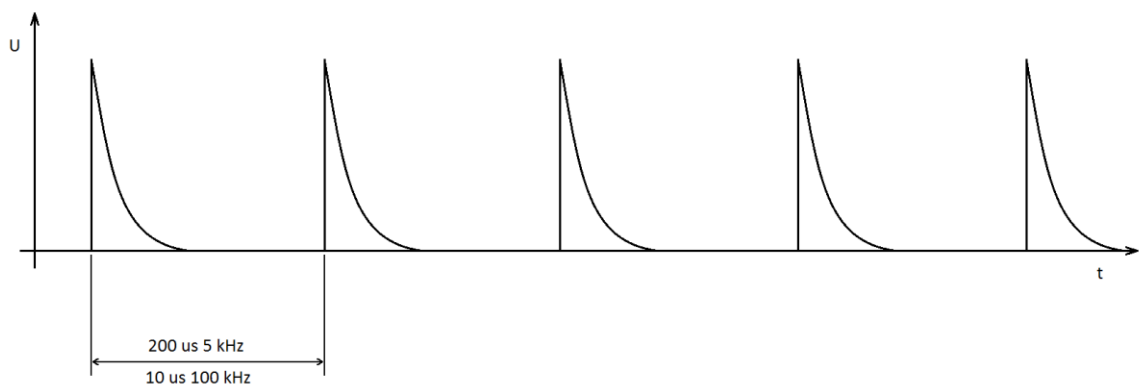
Tässä työssä käsitellään kuviossa 6 esitettyä luokkaa ”Johtuvat häiriöt” ja sen alaluokkaa ”Nopeat transientit”. Johtuvat häiriöt tarkoittavat laitteiden välisissä kaapeleissa siirtyviä häiriöitä (Honkanen 2013b).

### 3 Testausstandardi

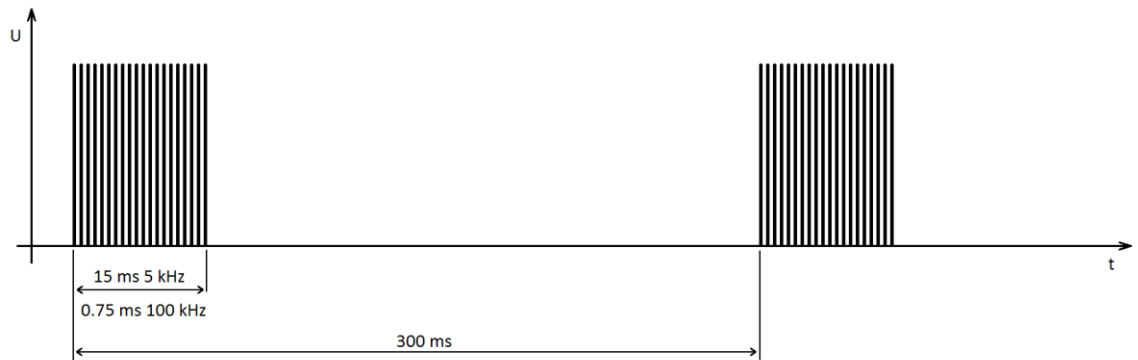
EN 61000-4-4 EFT/B -standardi määrittelee testauksen nopean transienttipurskeen häiriösimuloinniksi, jossa releen tai kontaktorin kipinäntoiminta aiheuttaa häiriötä. Standardi määrittelee käytettävät testausympäristöt, käytettävät jännitetasot, taajuuudet ja pulssin nousunopeuden, sekä pulssin leveyden. (EN 61000-4-4 2012, 6 - 9.)

#### 3.1 Purskeen määrittely

Standardi määrittelee EFT/B:ssä käytettävien purskeiden keston, pulssien määrän, taajuuden, amplitudin sekä pulssin muodon ja keston. Purskeille on määritetty kaksi eri taajuutta: 5 kHz:n ja 100 kHz:n taajuuudet. Kummassakin pursketaajuudessa lähetetään purskeita  $300 \pm 60$  ms:n välein, vähintään minuutin ajan. (EN 61000-4-4 2012, 11 - 13.)



Kuvio 7. Purskeen taajuus  
(Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 12.)



Kuvio 8. Purskeen toistoväli  
(Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 12.)

Pulssin amplitudi on määritelty I/O-pinnien ja väylien testaukseen minimissä 0,25 kV ja maksimissa 2 kV, teholähteen liitäntään minimissä 0,5 kV ja maksimissa 4 kV, taulukossa 1 on eritelty nämä tasoittain. Lisäksi on taso X, jossa amplitudi voi olla yli, ali tai tasojen välissä. (EN 61000-4-4 2012, 10.)

Taulukko 1. Testaustasot  
(Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 10.)

Avoimen piirin testausjännitteet ja impulssien toistotaajuudet				
Tasot	Teho- ja maadoitusliitännät		Signaalit ja ohjausportit	
	Jännitehuippu kV	Toistotaajuus kHz	Jännitehuippu kV	Toistotaajuus kHz
1	0,5	5 tai 100	0,25	5 tai 100
2	1	5 tai 100	0,5	5 tai 100
3	2	5 tai 100	1	5 tai 100
4	4	5 tai 100	2	5 tai 100
X	Erityinen	Erityinen	Erityinen	Erityinen

Taulukossa taso X on merkittyjen tasojen 1, 2, 3 ja 4 ala/yläpuolelle tai väliin jääville arvoille. Nämä määritellään testauksen yhteydessä tuotteen tarpeiden mukaan, eli jos on kyseessä pienjännitelaitte, jossa on minimaaliset suojaukset, voidaan käyttää pienempiä jännitteitä, kuin taulukossa on määritetty. (EN 61000-4-4 2012, 10.)

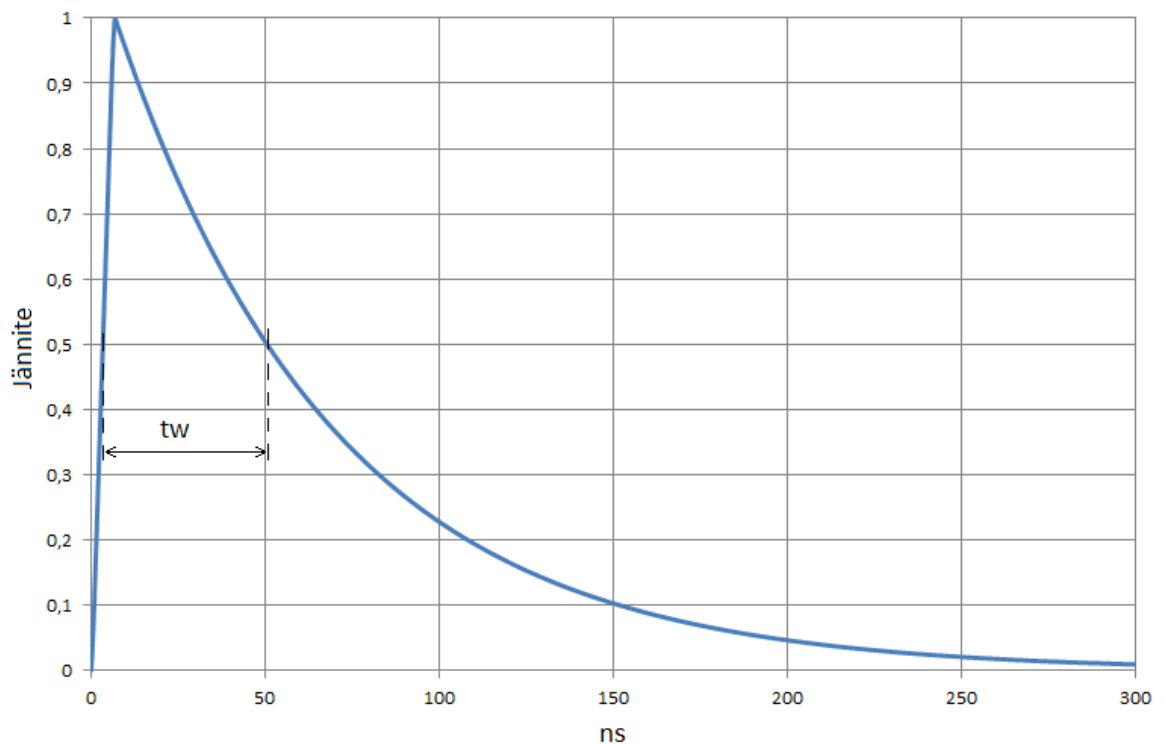
Standardissa on kalibrointimäärittely, jossa kerrotaan kuinka paljon huippujännitteen taso voi tippua asetetusta arvosta tietyllä kuormalla. Taulukossa 2 on esitetty kolme eri kalibrointikuormitusilannetta. Nämä ovat avoin piiri, 1000 ohmia, 50 ohmia ja jännitetasot näille. Transienttigeneraattori kalibroidaan niin, että huippujännitteen toleranssi on taulukkoarvosta 50 ohmin kuormalla  $\pm 10\%$  ja 1000 ohmin kuormalla  $\pm 20\%$ . Lisäksi pulssin nousuaika, pulssin leveys, toistotaajuus, purskeen kesto ja purskeen jaksonaika pysyvät annettujen toleranssien sisällä jokaisella kalibrointijännitteellä. (EN 61000-4-4 2012, 13 – 14.)

Taulukko 2. Jännitteen huippuarvot ja toistotaajuudet kalibroinnissa  
(Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 14.)

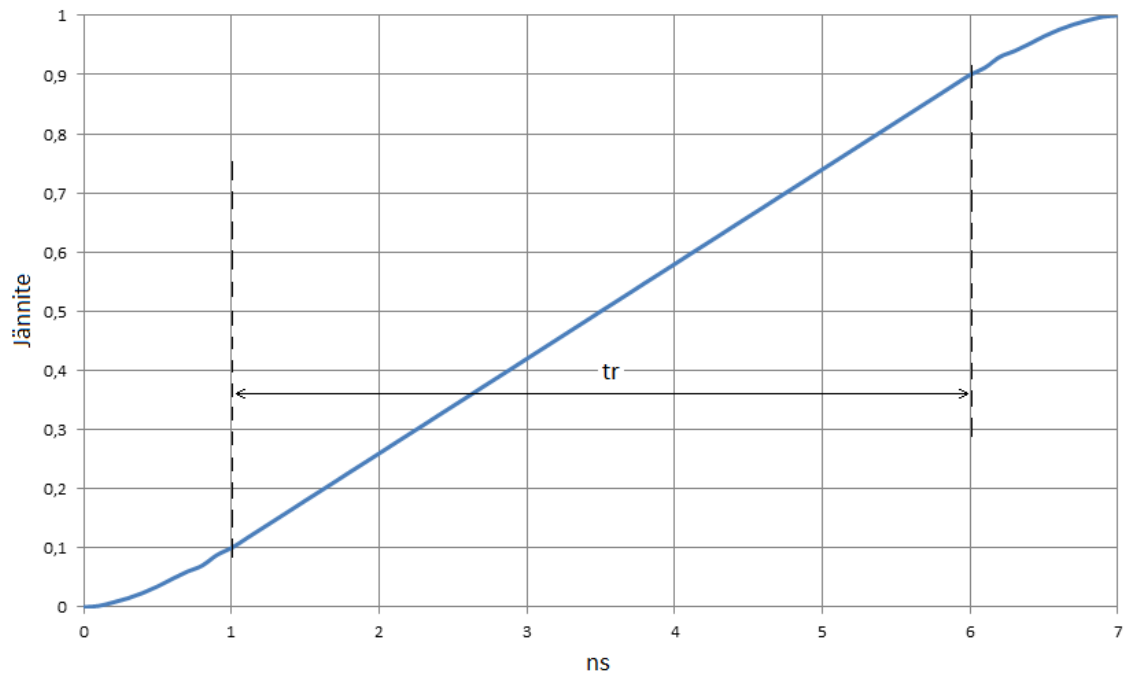
Asetettu jännite	$V_p$ (avoin piiri)	$V_p$ (1000 $\Omega$ )	$V_p$ (50 $\Omega$ )	Toistotaajuus
kV	kV	kV	kV	kHz
0,25	0,25	0,24	0,125	5 tai 100
0,5	0,5	0,48	0,25	5 tai 100
1	1	0,95	0,5	5 tai 100
2	2	1,9	1	5 tai 100
4	4	3,8	2	5 tai 100

### 3.2 Yksittäisen pulssin muoto

Standardi kuvaa yksittäisen pulssin niin, että se vastaisi mahdollisimman paljon oikeaa transienttipiikkiä. Yksittäisen pulssin nousuajaksi  $t_r$  (kuvio 9) on määritelty 5 ns ( $\pm 1,5$ ). Nousuaika mitataan, kun jännite nousee 10 - 90 % huippujännitteestä. Pulssinleveydeksi  $t_w$  on määritelty 50 ns ja toleranssiksi -15 ns ja +100 ns. Pulssinleveys mitataan, kun nousureuna on saavuttanut 50 % maksimijännitteestä ja laskeva reuna on laskenut 50 % maksimijännitteestä. (EN 61000-4-4 2012, 12.)



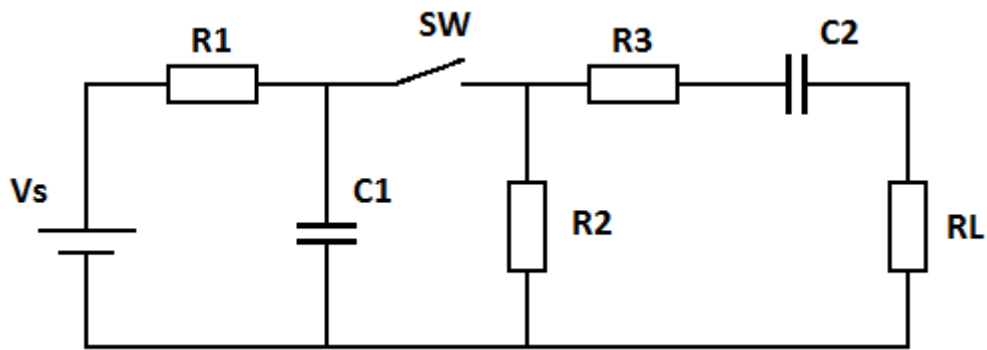
Kuvio 9. Yksittäisen pulssinmuoto  
(Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 12.)



Kuvio 10. Pulssin nousureuna  
(Perustuu standardiin IEC 61000-4-4 2012, 12.)

### 3.3 EFT/B-generaattorin peruskytkentä

Standardissa EN 61000-4-4 on esitetty yksinkertainen kytkentäkuva testauslaitteen periaatteesta. Laitteen toiminta perustuu nopeaan kondensaattorin purkautumiseen, jolla voidaan simuloida releen tai kontaktorin kipinöinnistä aiheutuvia jännitepiikkejä. Standardi ei kuitenkaan puutu yksityiskohtaisesti kytkennän rakenteeseen, vaan jättää sen laitevalmistajien tehtäväksi. (EN 61000-4-4 2012, 10 - 12.)



Kuvio 11. Standardin esittämä periaate kytkennästä  
(Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 11.)

Kuviossa 11 on esitetty periaate kytkennästä, missä kuvan merkinnät ovat seuraavat:

$V_s$	suurjännitelähde
$R_1$	latausvastus
$C_1$	energiavarastokondensaattori
$R_2$	pulssin muotoilu vastus, jolla voidaan vaikuttaa pulssinleveyteen
$R_3$	impedanssia vastaava vastus, eli koaksiaalikaapelin impedanssia vastaava vastus
$C_2$	tasajännitteen estokondensaattori
$SW$	suurjännitekytkin
$R_L$	kuorma (testattava laite).

Standardissa ei määritellä tarkemmin komponenttien arvoja, muuta kuin tasajännitteen estokondensaattori  $C_2$   $10 \pm 2$  nF ja ulostuloksi  $50 \Omega$  koaksiaalikaapeli. (EN 61000-4-4 2012, 10 - 12.)

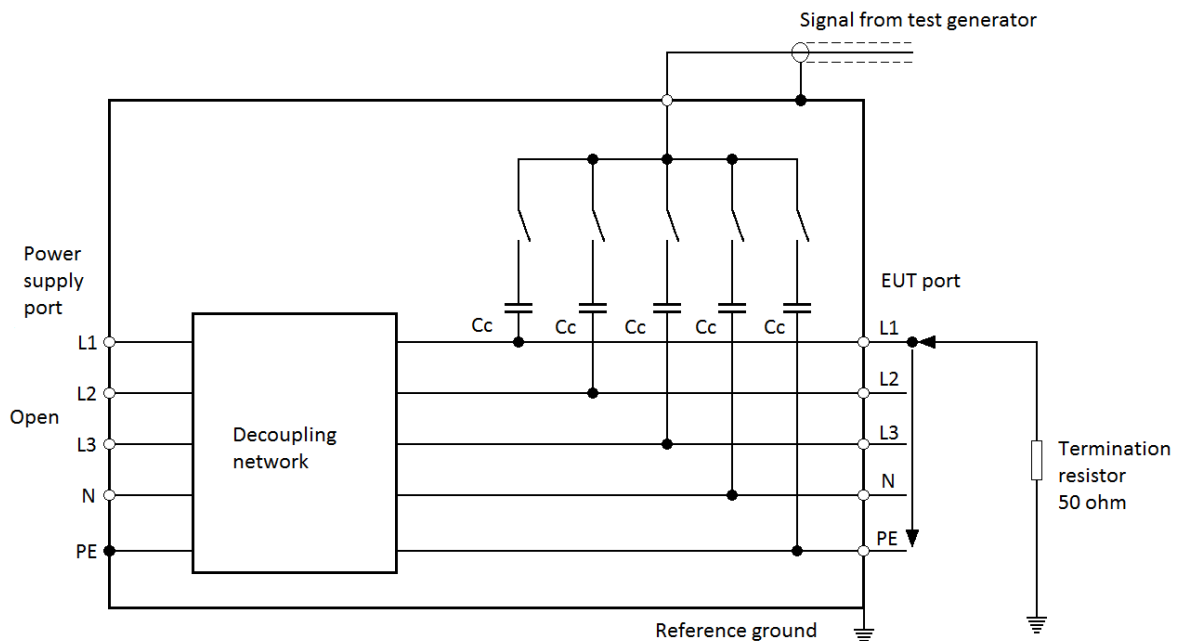
### 3.4 Testausympäristö ja -välineet

Standardissa on esitetty hyväksytyt testausvälineet, -asetukset ja -liitännät EFT/B-generaattorin liittämiseksi. Generaattorin liitäntä riippuu paljon siitä mitä testataan. Jos testataan tehonsyöttöä ja maadoitusta, niin generaattori voidaan liittää suoraan näiden kaapeleihin. Signaalien testaukseen taas suositellaan erillistä kapasitiivista kytkentää, missä transientti kytkeytyy kapasitiivisesti testattavan laitteen kaapeliin. (EN 61000-4-4 2012, 14 - 18.)

Ympäristöstä, jossa testaus tapahtuu, on annettu ohjeet eli minkälaisia materiaaleja ja kaapelointeja käytetään. Testattavien laitteiden ja kytkentöjen välille on tietyt mitat, joiden mukaan ne asetellaan.

#### 3.4.1 Teholähdekytkentä

Jännitesyötölle ja maadoitukselle on määritelty oma kytkentäliitos, jolla EFT/B-generaattori liitetään testattavaan laitteeseen.



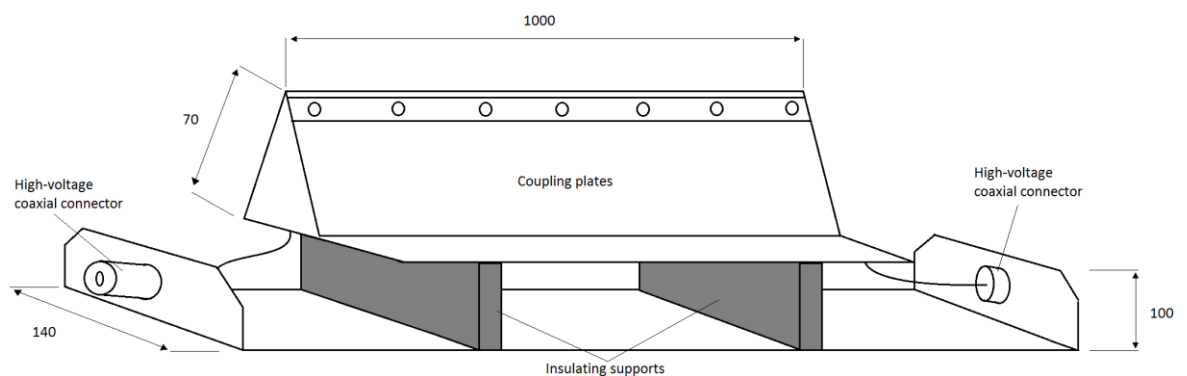
Kuvio 12. Generaattorin liittäminen testattavan laitteen teholähdeliitännään (Perustuu standardiin EN 61000-4-4 2012, 16.)



EFT/B-generaattori liitännässä on kytkimet, joilla valitaan syötetäänkö transienttipurskeet tehosyöttöihin vai maadoitukseen. Kytkenässä on estosuodatin ulkoiselle tehosyötölle, minkä tarkoitus on estää transienttia kulkemasta teholähteelle.

### 3.4.2 Signaalikytkentyminen

Signaalikaapeleita varten on kapasitiivinen kytkentä, jossa EFT/B-generaattoria ei liitetä galvaanisesti signaalikaapeleihin, vaan kaapelit vedetään metallilevyistä valmistetun tunnelin läpi.



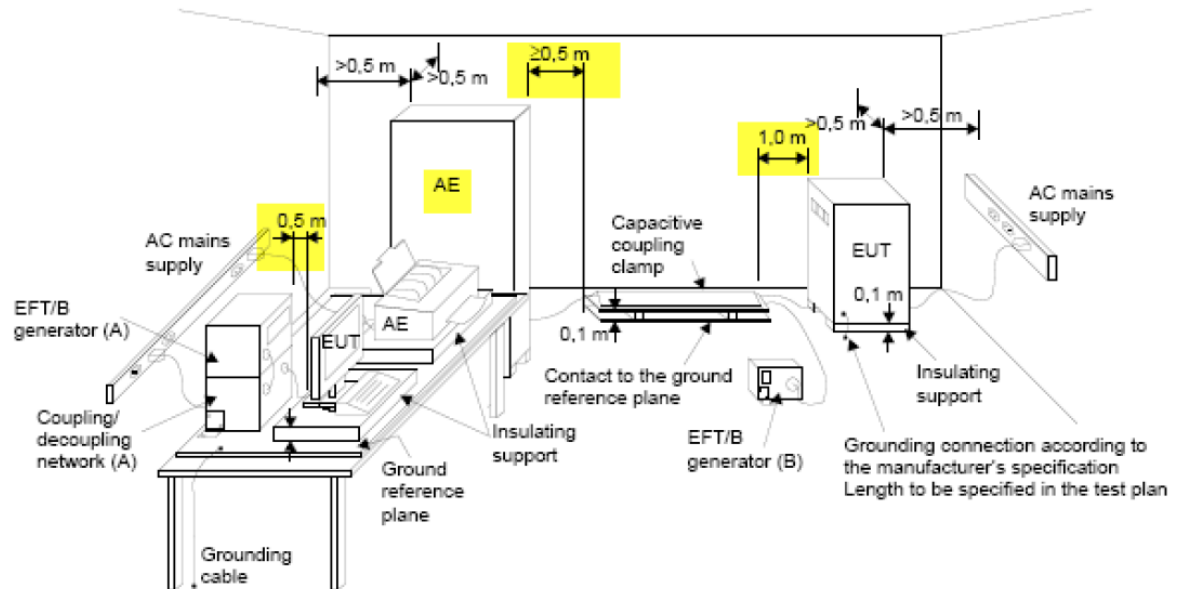
Kuvio 13. Signaalikaapeleiden kapasitiivinen kytkentä  
(Perustuu standardiin IEC 61000-4-4 2012, 17.)

Tunneli kiinnitetään pohjalevyyn eristysjaloilla, koska tunnelin metallilevyihin syötetään EFT/B-generaattorilla transienttipurskeet. Transienttipiikit välittyvät tunnelin metallilevyistä kapasitiivisesti testattavan laitteen signaalikaapeleihin. Pohjalevyyn on kiinnitetty kaksi koaksiaali-liitintä, joista ensimmäiseen liitetään EFT/B-generaattori ja toiseen liitetään oskilloskooppi. Näistä liittimistä on erilliset johtimet kytkettynä tunnelin alimpaan metallilevyyn.

Kytkenän kapasitanssi riippuu käytettyjen kaapeleiden halkaisijasta sekä onko kaapelissa metallinen suojakuori (shield) (EN 61000-4-4 2012, 16 - 17).

### 3.4.3 Testausympäristö

Standardissa määritellään testauksessa käytetyn ympäristön rakenne, kuten etäisyydet testattavien laitteiden ja testilaitteiden välille. Lisäksi määritellään tarvittavia eristysksiä sekä lisämaadoituksia, ja tehonsyöttöliitännät. (EN 61000-4-4 2012, 20.)



Kuvio 14. Yleiskuva testausympäristön asettelusta (Dudenhoeffer 2012.)

Kuviossa 14 on standardin määrittelemä testauslaitteistot ja niiden etäisyydet toisiinsa. Referenssipisteet eristetään kaikista muista mittauspisteistä ja laitteista. Eristykset on määritelty eristysmateriaalien paksuuden ja aseteltavien kohtien mukaan siten, että kuinka paksult ja mihin väleihin lisätään eristysmateriaalia. (EN 61000-4-4 2012, 21 – 23.)

## 4 Käytetyt menetelmät

Tässä luvussa kerrotaan, miten työssä edetään ja mitä vaiheita työhön kuuluu. Aluksi esitellään lyhyesti työkalut, joita käytetään suunnittelussa, simuloinnissa ja testaamisessa. Lisäksi mainitaan lyhyesti miten kutakin työkalua tullaan hyödyntämään ja mitä niillä voidaan tehdä. Näihin työkaluihin kuuluu ohjelmia ja laitteita.

### 4.1 Transienttigeneraattorin suunnittelu

Suunnittelussa tutustutaan ensiksi mahdollisiin kytkennän toteutustapoihin. Kun kytkennän toteutustapa on valittu, kytkennän eri osat suunnitellaan erikseen. Seuraavaksi kytkennälle lasketaan toiminnallinen teoria, jonka avulla määritellään tarvittavien komponenttien arvoja. Laskelmien tekemiseen käytetään apuna Microsoft Office Excel -taulukkolaskentaa, jolla voidaan piirtää tarvittaessa kuvaajia esittämään muutoksia.

Ennen kuin kytkentää rakennetaan, voidaan sitä simuloida Linear Technologyn LTSpice-ohjelmalla tai National Instrumentsin Multisim-ohjelmalla. Ohjelmista ei välttämättä löydy aina tarvittavia komponentteja, vaan on käytettävä vastaavia komponentteja. Simuloinnit ovat yleensä suuntaa antavia eivätkä niiden tulokset ole aina täysin paikkansapitäviä.

Kytkenästä rakennetaan koekytkentä esimerkiksi yksipuoliselle liuskakuparoidulle piirilevyille, jotta voidaan testata kytkentä kokonaisuutena käytännössä. Testaus kannattaa tehdä huolella, jotta valmiiseen laitteeseen ei tarvitse enää jälkeinpäin tehdä suuria muutoksia. Kytkennän toimivuutta mitataan Tektronix MSO 4104B- ja GW instek GDS-1042 -oskilloskoopeilla ja ohjausta testataan Tektronix AFG 3252 -signaaligeneraattorilla.

Kun kytkentä todetaan toimivaksi, voidaan aloittaa piirilevyn suunnittelu, jossa käytetään suunnitteluohjelmana avoimen lähdekoodin Kicad-ohjelmaa. Suunnittelussa määritellään aluksi mekaanisia mittoja sekä mahdollisia kotelovaihtoehtoja, johon piirilevy pitäisi saada mahtumaan. Lisäksi pitää ottaa huomioon mahdolliset häiriö-

tilanteet sekä kuinka piirilevy valmistetaan, eli onko yksikerroslevy vai kaksikerroslevy.

Kun piirilevy on suunniteltu ja piirretty, niin valmistetaan koepiirilevy ja kalustetaan se. Tämän jälkeen kokeilulaite testataan, mikäli testauksessa löytyy mahdollisia vikoja tai muita toiminnallisia epäkohtia. Jos vikoja ja epäkohtia löytyy, niin aloitetaan kytkennän jatkokehitys samassa järjestyksessä kuin edellä. Sillä lisäyksellä, että ensin selvittää mistä vika tai epäkohta johtuu.

## **4.2 Transienttigeneraattorin simulointi**

KytKentää simuloidaan ensisijaisesti LTSpice-ohjelmalla ja tarpeen mukaan tehdään lisäsimulointi Multisim-ohjelmalla. Simuloinnin tuloksia verrataan teoriaan, jotta voidaan arvioida muutostarpeita kytkentään. LTSpicen simulointiohjelmassa on kuitenkin aika suppea komponenttivalikoima, ja simuloinnissa voidaan käyttää vain vastaavia komponentteja. Tämä kuitenkin on riittävä, koska on tarkoitus löytää vain mahdollisimman toimiva kytkentä. Täytyy kuitenkin muistaa, että simulointi on vain suuntaa antava eikä siitä voi tehdä lopullisia johtopäätöksiä kytkennän toimivuudesta. Lopulliset päätökset tehdään vasta käytännön testauksen tulosten pohjalta, jolloin voidaan paremmin arvioida kytkennän toimivuutta.

## **4.3 Käytännön testaus**

Käytännön testauksessa testataan myös yksittäisiä komponentteja, jotta voidaan todeta, ovatko komponentit ominaisuuksiltaan riittäviä tarkoitustaan varten. Joidenkin komponenttien testaaminen voi kuitenkin jäädä vajaaksi maksimi-arvojen testauksessa. Tämä johtuu siitä, että testit pitäisi toteuttaa maksimijännitteellä, joka on laitteelle määritelty, mutta riittävää suurjännite teholähdettä ei ole saatavilla. Kytkentöjen toimintaa testataan myös osittain, eli ei rakenneta koko kytkentää kerralla. Kytkennästä tehdään pieni osuus, testataan sen toiminta ja laajennetaan siitä eteenpäin.

Käytännön testauksessa rakennetaan koekytkentä ja testataan sen toiminta. Testauksen tuloksia verrataan teoriaan ja simulointiin, jotta voidaan arvioida muutostarpeita. Testauksessa käytetään yleismittaria, jotta voidaan mitata tarkasti sähköisiä arvoja, kuten käyttöjännitettä, komponenttien aiheuttamia häviöitä tai muita komponenttien sähköisiä arvoja. Lisäksi tarvitaan tallentava oskilloskooppi, jolla voidaan mitata ja tallentaa kuvia mitatuista arvoista ja signaalin muodoista. Kuormana käytetään standardissa määriteltäviä kuormia, ja testaustuloksia verrataan standardin määrittelemiін arvoihin.

Kun piirilevy on toteutettu ja kalustettu tarvittavilla komponenteilla, tehdään samat testaukset myös sille. Kun laite todetaan toimivaksi, tehdään käyttöönottestaus ja laaditaan tämän pohjalta käyttöohjeet laitteelle.

## 5 Vaatimukset

Transienttigeneraattorin toteutusta tutkitaan kolmena eri pääosana, joita ovat energiavarasto, teholähde ja liipaisuohjaus. Jokainen pääosa sisältää pieniä osakokonaisuuksia, joiden toteutus käydään läpi erikseen.

### 5.1 Käyttökohteen määrittely

Transienttigeneraattoria käytetään Epec-ohjausyksiköiden I/O-pinnien kestävyys-  
den testaamiseen. Jokaisessa I/O-pinnissä on suojaus transienttia vastaan, ja tällä  
laitteella on tarkoitus testata, kuinka suuria transienttipiikkejä I/O:n suojaus kestää  
ja tarvitseeko suojausta parantaa. Lisäksi rikkoutuneiden suojauksien jälkeen teh-  
tävistä testeistä saadaan selville, mitkä osat hajoavat seuraavaksi ja miten se vai-  
kuttaa tuotteen toimintaan.

### 5.2 Toiminnallisia vaatimuksia

Transienttigeneraattorille määriteltiin maksimijännitteeksi 500 voltia, jota käyttäjä  
voi säätää tarpeen mukaan. Virtatarve määräytyy energiavarastona toimivan kon-  
densaattorin latausnopeuden mukaan niin, että se voidaan kytkeä riittävän nope-  
asti useita kertoja peräkkäin. Standardissa tämä nopeimman purskeen taajuus on  
100 kHz, mikä on 10  $\mu$ s jakson pituutena, eli energiavaraston kondensaattori pitää  
saada ladattua alle 10  $\mu$ s:ssa.

Liipaisun ohjauksessa on kaksi vaihtoehtoa, jotka ovat kytkin, jolla voidaan toteut-  
taa yksittäisiä liipaisuja tai signaaligeneraattorin liitettä, jolla voidaan toteuttaa  
purskeohjaukset. Lisäksi tarvitaan valintakytkin, jolla voidaan valita joko positiivi-  
nen tai negatiivinen transientti.

Ulkoisiksi liitännöiksi tarvitaan koaksiaali-liitimet transientin ulostuloa varten ja sig-  
naaligeneraattorille ohjausta varten. Lisäksi tarvitaan tehonsyöttöliitäntä sekä mit-  
tausliitännät, joihin voidaan kytkeä ulkoisia mittalaitteita, kuten yleismittari ja oskil-  
loskooppi.

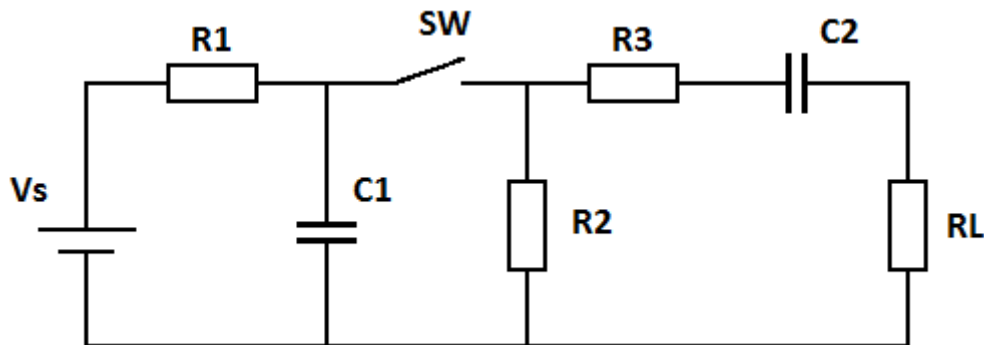
Standardissa on määritelty nopeudet EFT/B-transientille, eli jännitteen nousunopeus on 5 ns, toleranssilla  $\pm 1.5$  ns ja pulssin kestoksi 50 ns, toleranssilla -15 ns + 100 ns. Pursken taajuudeksi on kaksi vaihtoehtoa: 5 kHz, eli jaksonaika 200  $\mu$ s ja 100 kHz, eli jaksonaika 10  $\mu$ s

### 5.3 Turvallisuus

Laitteessa käytetään suurjännitettä, joka ylittää tasajännitteelle asetetun 60 VDC:n rajan. Tällöin on suojattava kaikki osat niin, ettei niihin pääse koskettamaan. Laite asennetaan suojakoteloon niin, ettei suurjännitteisistä osista muodostu vaaraa käyttäjälle. Ulostuleva testattavan laitteen liitäntä voi kuitenkin aiheuttaa vaaratilanteen silloin, jos laitteesta rikkoutuu tiettyjä komponentteja. Näitä komponentteja ovat esimerkiksi suurjännitekytkin sekä tasajännitteen estokondensaattori. Vikatilanteessa nämä komponentit olisivat yhtäaikaan oikosulussa, jolloin suurjännite kulisi suoraan teholähteeltä ulostuloliitintään aiheuttaen sähköiskun vaaran.

## 6 Piiriteoria

Tässä osiossa käsitellään kytkennän toiminnallista piiriteoriaa, joka toimii myöhemmin kytkennän simuloinnin ja käytännön rakentamisen pohjana. Teoriassa lasketaan saatujen tietojen pohjalta komponenteille arvoja, joita voidaan tarkentaa simuloinnissa ja koekytkennässä.



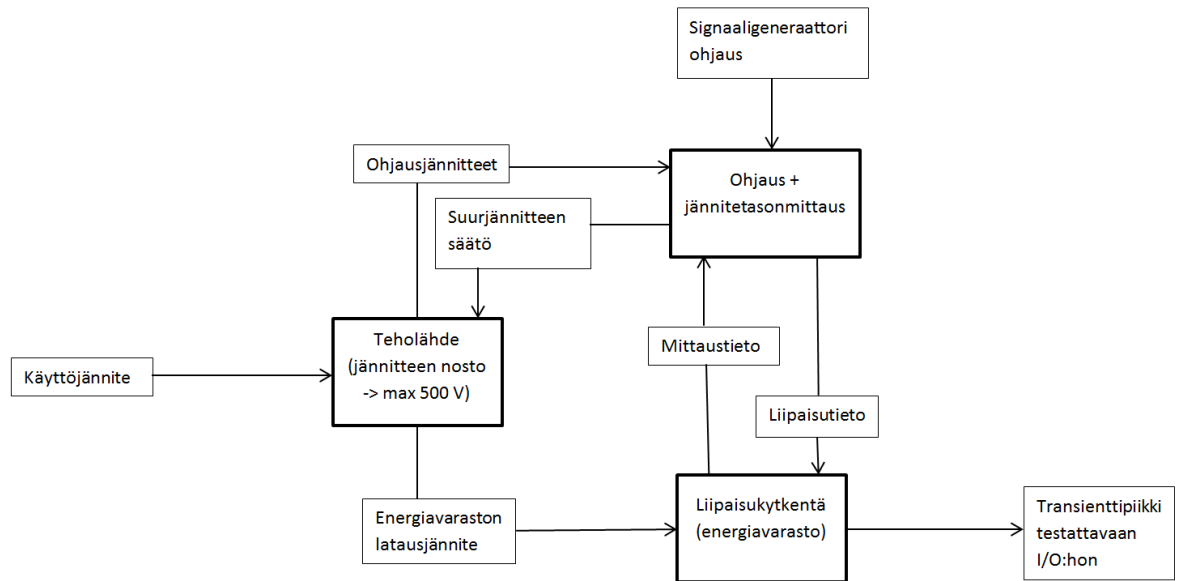
Kuvio 15. Kytkenän perusta

Kytkenän perustana käytetään standardissa EN 61000-4-4 esitettyä peruskytkentää, jonka pohjalle laitetta aletaan suunnitella.

### 6.1 Laitteen lohkokaavio

Aluksi laitteen kokonaisuus puretaan eri toimintaosiksi, jolloin voidaan tutkia pienempiä osia kokonaisuudesta. Esimerkiksi laitteen tarvitsema tehrolähde voidaan määritellä omaksi toimintaosaksi, koska se voi toimia tarvittaessa itsenäisesti tai se voidaan jopa korvata erillisellä tehrolähteellä. Tässä on hyvänä apuna lohkokaavio laitteesta, jolloin laite voidaan jakaa pääosiin ja määritellä näiden välistä toimintoja. Pääosien välisinä toimintoina esimerkiksi ohjaus saa käyttöjännitteen tehrolähteeltä ja ohjauksella voidaan säätää tehrolähteen tuottamaa suurjännitettä energiavaraston lataukselle.





Kuvio 16. Laitteen lohkokkaavio

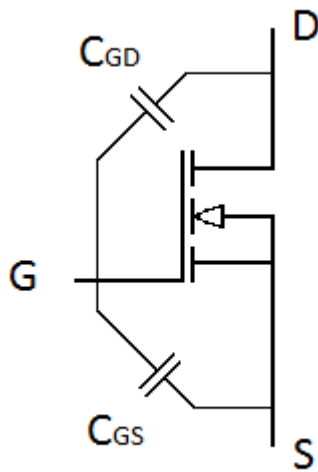
Lohkokkaavio selkeyttää laitteen rakennetta ja sen avulla voidaan purkaa yksi lohko kerralla pienempiin osiin suunniteltaessa. Tärkein ja haastavin on liipaisukytkentä, tämä johtuu siitä, että pulssit ovat todella nopeita.

## 6.2 Liipaisu

Liipaisuun tarvittava kytkin on hankalin komponentti, koska liipaistava energia on suuri, sekä tässä työssä tarvittava pulssinopeus. Nämä ovat rajoittavimmat tekijät komponenttia valittaessa. Eräs vaihtoehto juuri tämän kaltaisia laitteita varten olisi Behlken valmistama HTS 30-08-UF, joka on todella nopea kytkinmoduuli. Valmistaja lupaa tälle jopa alle 1 ns:n nousuaikaa ja maksimijännitteeksi 3 kV. (Behlken 2001.)

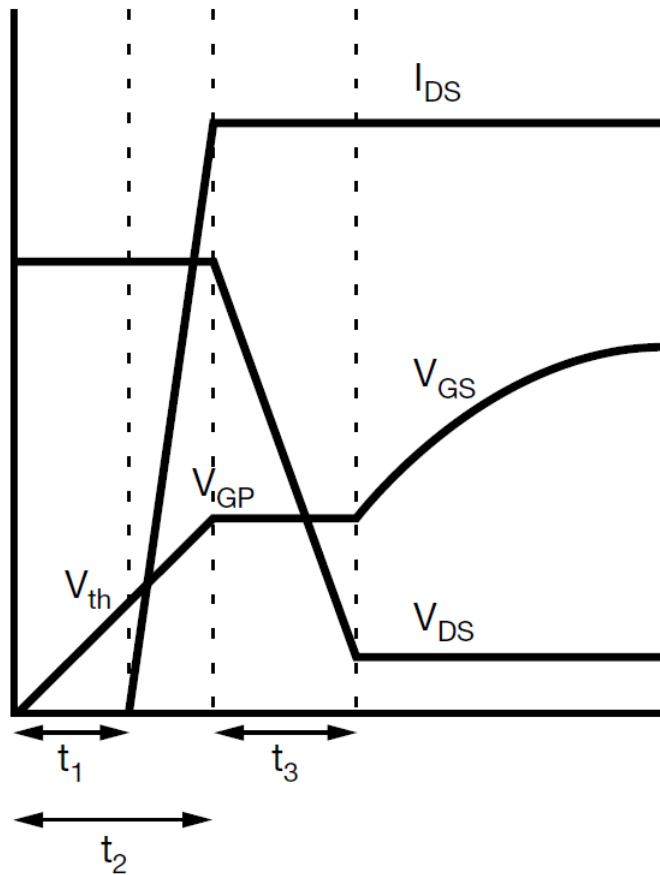
Työn tarkoituksena on kuitenkin tutkia mahdollista toteutusta erillisinä komponentteina, jonka vuoksi kytkimeksi valittiin erillinen mosfet-transistori. Tällä mosfetilla on tarkoitus kytkeä latautuneen energiavaraston jännite ulostulo kytkentään. Mosfet-kytkimen valintaan vaikuttaa eniten jännitteen- ja virrankesto sekä nousureunan nopeus. Lisäksi mosfetit ovat jänniteohjattuja, jolloin pientaajuusalueella hilan ohjausvirran tarve on lähes nolla. Suurilla taajuuksilla hilan ohjausvirran tarve kuitenkin kasvaa, koska hilan ja nielun, sekä hilan ja lähteen välillä on jonkin verran

hajakapasitanssia, joka täytyy ladata ennen kuin mosfet saadaan johtavaksi. (Silvonen 2009b, 200.)



Kuvio 17. Mosfetin hilaan vaikuttavat hajakapasitanssit

Kuviossa 17 on esitetty mosfetin kytkemiseen vaikuttavat kapasitanssit. Nämä kapasitanssit pitää saada ladattua tai purettua aina, kun mosfet kytketään johtavaan tai johtamattomaan tilaan. Latausaika saadaan kutistettua riittävän pieneksi suurella virtapulssilla, joka lataa kapasitanssin nopeasti ja transistori pääsee johtavaan tilaan. Tätä kuitenkin vaikeuttaa mosfetin hila-nielu-kapasitanssi  $C_{GD}$ , jonka latausaikaan vaikuttaa nielujännite. Toisin sanoen, kun nielujännite kasvaa niin kapasitanssin  $C_{GD}$  latausaika kasvaa, koska nielujännite vastustaa kapasitanssin latautumista. Tätä ilmiötä kutsutaan Miller-kapasitanssiksi. (Brown 2004, 3.)



Kuvio 18. Mosfetin ohjaus johtavaan tilaan  
(Brown 2004, 3.)

Kuviossa 18 merkintä  $t_1$  on hilan kynnysjännitteen nousuun kulunut aika,  $t_2$  sisältää kynnysjännitteen nousun lisäksi virrannousajan  $I_{DS}$ , ja  $t_3$  on  $C_{GD}$ :n latautumisaika. Aika  $t_3$  on vaikein laskea, koska siihen vaikuttaa nielun ja lähteen välinen jännite  $V_{DS}$ . (Brown 2004, 3.)

Liipaisuun tarvittavan energiapulssin siirtoon sopivana ratkaisuna käytettiin pulssimuuntajaa, joka samalla erottaa tarvittavan ohjauselektroniikan energiavaraston tarvitsemasta suuresta jännitteestä. Tämä lisää myös käyttöturvallisuutta, koska ohjauksen puolella ei tarvitse käsitellä ohjausjännitettä suurempaa jännitettä.

Testien perusteella ohjausjännitteen pitäisi olla säädettävissä + 12 voltista + 24 volttiin, liipaisuun käytettävässä mosfetissä vaikuttavan Miller-kapasitanssin takia. Tätä varten tehollähteessä pitäisi olla oma säätö myös liipaisuun käytettävän mosfetin ohjausjännitteelle. Tällä voitaisiin säätää ohjausjännitettä sitä mukaa suuremmaksi, kun liipaisuun käytettävän mosfetin nielujännite kasvaa.

### 6.3 Pulssimuuntaja

Pulssimuuntajan toiminnan kannalta on tärkeää, ettei se vaikuta alentavasti pulssin jännitteeseen eikä pulssin nousevanreunan aikaan (Butler [Viitattu 27.4.2015]).

Liipaisuun käytettävän mosfetin kytkemiseen käytettävä pulssimuuntajan toisiokäämi liitetään hilan ja lähteen välille, jolloin pieni ohjausjännite riittää avaamaan mosfetiä sen verran, että energiavarastokondensaattorilta purkautuva suurjännite avaa mosfetin loppuun.

Pulssimuuntajan ensiökäämin jännitesyötölle lisätään kondensaattori, johon ladataan riittävä energiamäärä liipaisuun käytettävän mosfetin kytkemiseen. Pulssimuuntajaa ohjataan kytkemällä ensiökäämi maahan mosfetillä, jolloin kondensaattoriin latautunut energia purkautuu suurena virtapulssina ensiökäämin läpi ja indusoituu toisiokäämiin.

Jännitteenä ohjauksessa käytetään +12 voltista + 24 volttiin, jolloin pulssimuuntajan kytkemiseen käytettävä mosfet voi olla pienempi jännitteen kestoltaan kuin liipaisussa käytettävä mosfet.

Tähän kytkentään käytettävää kondensaattoria varten täytyy myös laskea latausvastus, kun mosfet kytketään maahan, niin se ei vedä tuota +12 - 24 voltin jännitelähdettä oikosulkuun. Vastuksen arvo lasketaan tuon nopeamman pulssitaajuuden mukaan niin, että kondensaattori ehtii latautua ennen seuraavaa liipaisua.

Purskeessa olevien pulssien välinen aika on 5 kHz:n taajuudella 200 us ja 100 kHz:n taajuudella 10 us. Näistä pienin aika määrittelee energiavarastokondensaattorin latausvastuksen arvon. Kondensaattorin täytyy latautua riittävästi ennen seuraavaa liipaisua, jotta pulssin vaatima energia pysyisi samana.

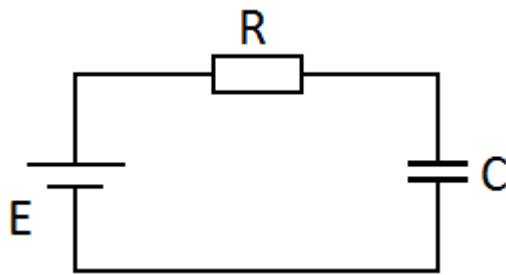
### 6.4 Energiavarastokondensaattori

Kondensaattorin lataus- ja purkausaikaan voidaan vaikuttaa kondensaattorin kapasitanssilla sekä lataamiseen ja purkautumiseen vaikuttavilla vastuksilla. Tässä

sovelletaan kaavaa, jonka avulla voidaan laskea latautumiseen ja purkautumiseen kulunut aika.

$$U_C = E * (1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

Kaavassa  $U_C$  on tiedetyn hetken jännite,  $E$  on tehonlähteen jännite,  $e$  on neperin luku,  $t$  on aika ja  $RC$  voidaan myös merkitä  $T$ , joka on aikavakio. Aikavakio saadaan vastuksen ja kondensaattorin tulosta. Aikavakiossa kondensaattorin on latautunut 63 % maksimijännitteestä, tai vaihtoehtoisesti purkautunut 63 % maksimijännitteestä. (Hautala & Peltonen 2009, 291 - 292.)



Kuvio 19. Kondensaattorin latauspiiri

Kondensaattorin valintaan vaikuttaa kondensaattorilta purettavan energian määrä, sekä lataus- ja purkuaika. Valinta tarkentuu myös simuloinnin ja käytännön testien myötä.

Latausaika saadaan laskettua kaavalla:

$$-t = T * \ln\left(1 - \frac{V}{V_{MAX}}\right) \quad (2)$$

Missä  $T$  on aikavakio, joka saadaan latausvastuksen ja energiavarastokondensaattorin tulosta, kaavalla:

$$T = R * C \quad (3)$$

Kaavan avulla voidaan helposti hakea tarvittava latausvastus kondensaattorille.

Vastukselle täytyy laskea myös tehonkesto, ettei vastus pala, kun sitä kuormitetaan. Teho riippuu paljon kytkennän päälläoloajasta, eli kuinka nopeasti energiavarastokondensaattori purkautuu. Tämä aika on kuitenkin todella lyhyt, jolloin kokonaisteho jää todella pieneksi. Kokonaisteho voidaan laskea kaavalla:

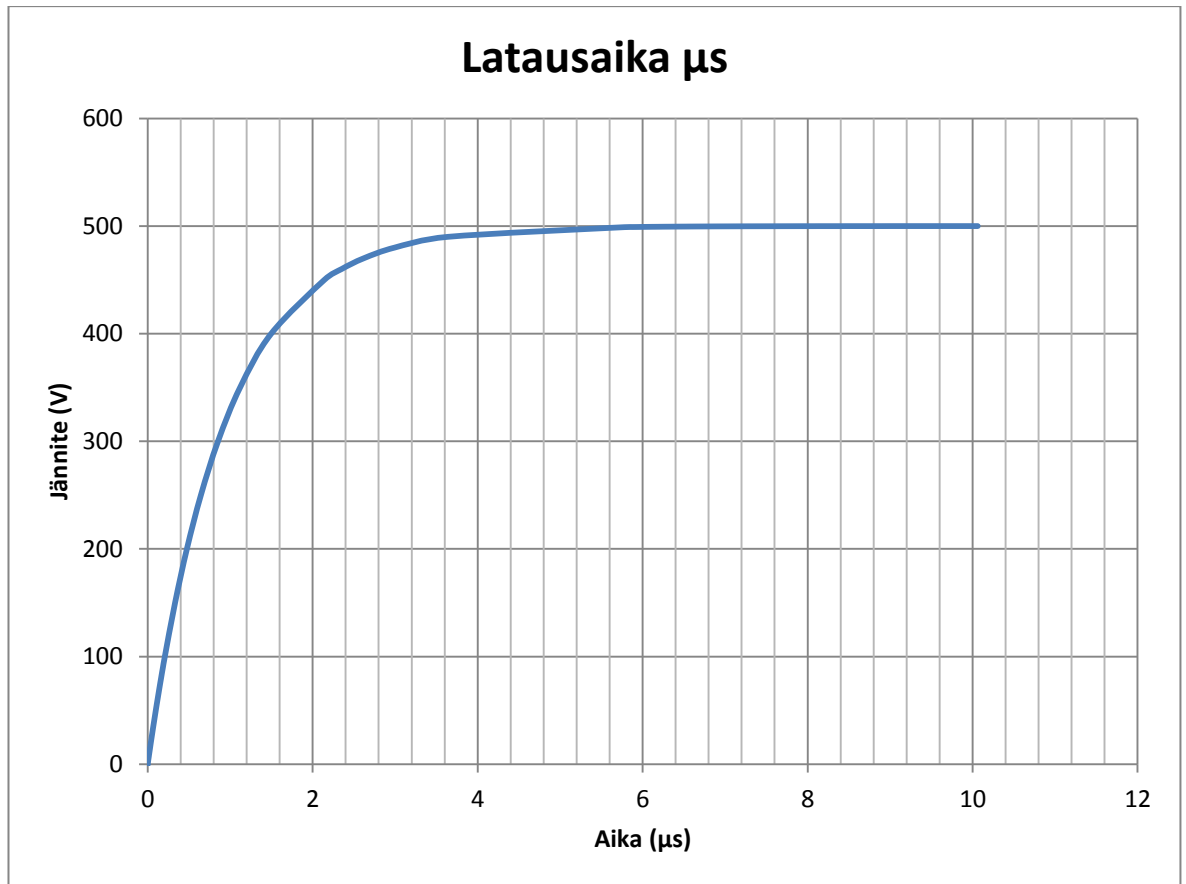
$$R_{TEHO} = R * I^2 \quad (4)$$

Tehollinen virta saadaan laskettua kaavalla:

$$I_{TEHO} = \frac{t_{on}}{t_k} * I_{MAX} \quad (5)$$

Kaavassa  $t_{ON}$  on päälläoloaika,  $t_k$  on jaksonaika ja  $I_{MAX}$  on maksimivirta. Maksimivirta muodostuu kun liipaisuun käytettävä mosfet alkaa johtaa, niin piirissä kulkee latausjännite kuviossa 15 merkittyjen vastusten  $R1$  ja  $R2$  kautta, jolloin hetkellinen maksimivirta voidaan laskea kaavalla:

$$I_{MAX} = \frac{U}{(R1+R2)} \quad (6)$$



Kuvio 20. Energiavarastokondensaattorin latausaika

Laskennassa käytettiin 3,3 nF kondensaattoria ja latausvastuksena 280 Ω:n vastusta. Vastuksen tehonkesto riippuu piirin päälläoloajasta, eli jos piiri olisi pidemmän aikaa suljettuna, niin latausvastuksen tehonkesto voitaisiin laskea kaavalla:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (7)$$

Tällöin tarvittaisiin tehonkestoltaan n. 900 W vastus. Piiri on kuitenkin lyhyen aikaa suljettuna, joten näin suurta tehonkesto ei tarvita, vaan voidaan käyttää tehonkestoltaan pienempää vastusta. Tehonkesto voidaan laskea piirin päälläoloajasta ja jaksonajasta laskemalla: Jos päälläoloaika ( $t_{ON}$ ) on maksimissa 100 ns ja jaksonaika ( $t_k$ ) 10 μs, sekä maksimijännite 500 V. Tällöin voidaan laskea teholliseksi jännitteeksi kaavalla:

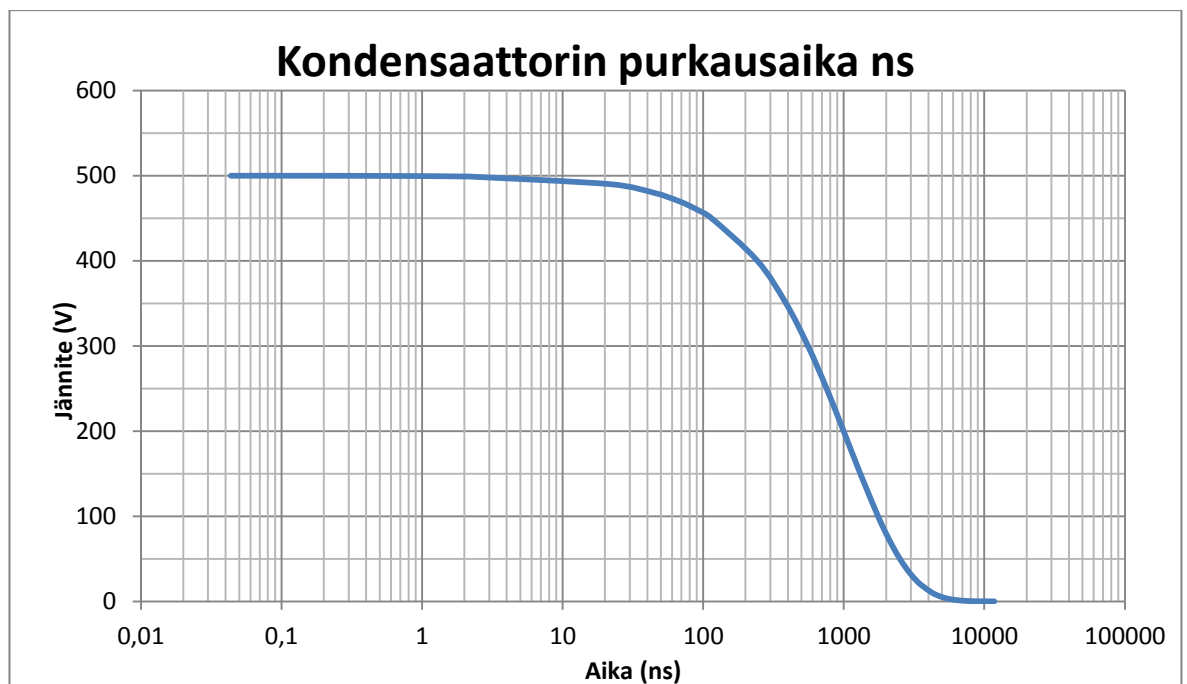
$$U = \frac{t_{ON}}{t_k} * U_{MAX} \quad (8)$$

Tämän perusteella voidaan tehonkestoksi laskea 0,09 W.

Kun kytkin suljetaan, niin kytkennässä vaikuttaa myös purkuvastus R2 (kuviossa 15), jonka arvona käytetään 330 Ω. Purkausvastuksena täytyy käyttää riittävän suurta vastusarvoa, jotta jännite ehtii nousta huippuarvoon. Purkausaika saadaan laskettua kaavalla:

$$-t = T * \ln\left(\frac{V}{V_{MAX}}\right) \quad (9)$$

Kaavassa T on aikavakio, V on jännitteen muutos ja  $V_{MAX}$  on jännitteen huippuarvo joka pysyy koko ajan vakiona.

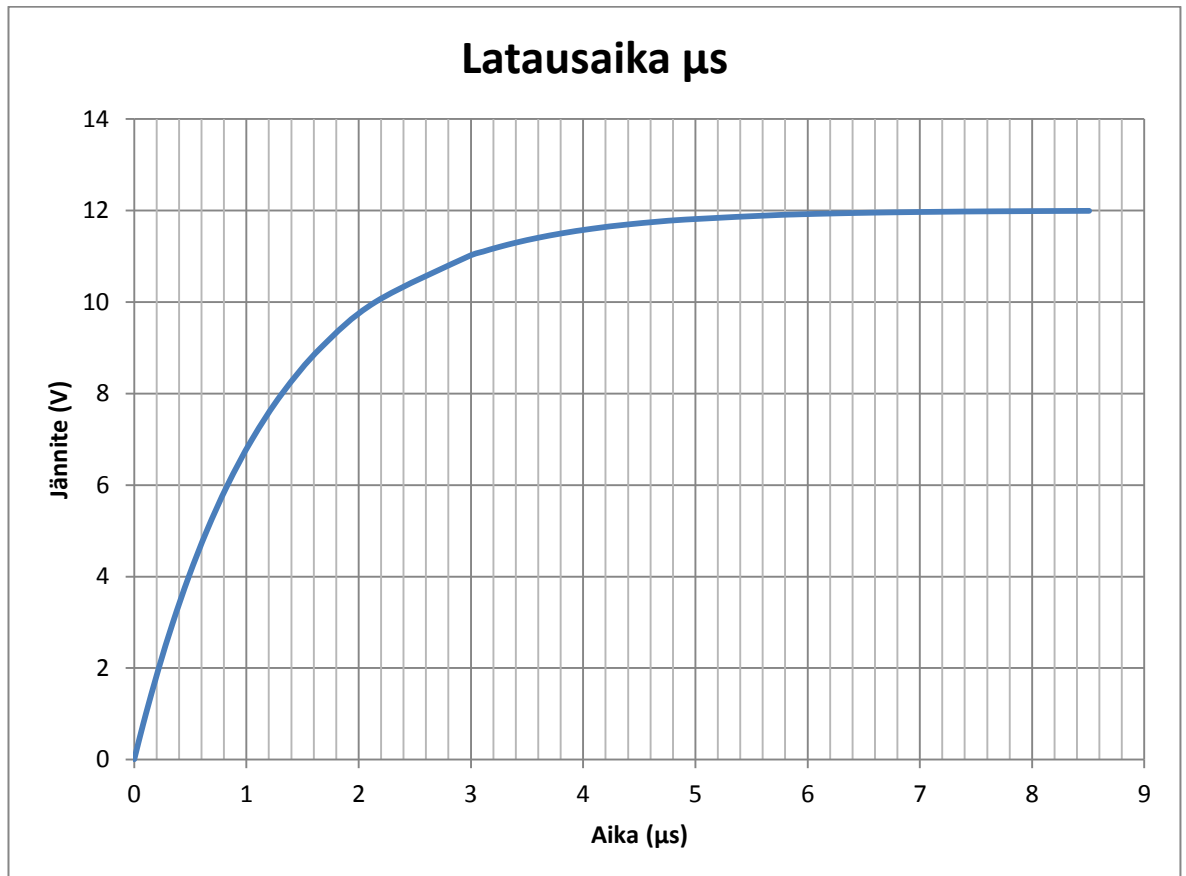


Kuvio 21. Energiavarastokondensaattorin purkausaika

Tästä kuitenkin seuraa se, että purkausaika venyy todella pitkäksi. Tähän käytettiin ratkaisuna suodatinkytkentää, joka esitellään myöhemmin.



Kytkenässä käytetään lisäksi toista energiavarastokondensaattoria, jota käytetään pulssimuuntajan energiavarastona. Kun pulssimuuntaja kytketään maahan, niin tämä kondensaattori purkautuu pulssimuuntajan ensiökäämin läpi ja aiheuttaa suuren virtapulssin. Tässä käytetty kondensaattori on kuitenkin suurempi kuin tuo transienttipiikin muodostama energiavarastokondensaattori. Tästä seuraa se, että latausvastuksen täytyy olla pienempi, jotta kondensaattori ehditään ladata riittävän nopeasti.



Kuvio 22. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattorin latausaika

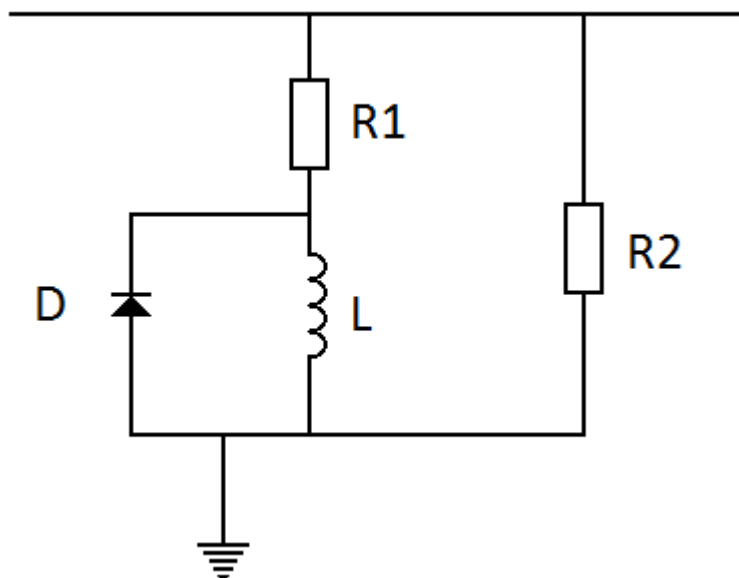
Laskennassa käytettiin 100 nF:n kondensaattoria ja latausvastuksena 12 Ω:n vastusta. Vastuksen tehonkesto riippuu piirin päälläoloajasta, eli jos piiri olisi pidemmän aikaa suljettuna, niin latausvastuksen tehonkesto voitaisiin laskea kaavalla:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (10)$$

Tällöin tarvittaisiin tehonkestoltaan n. 12 W:n vastus. Tehonkesto riippuu myös siitä, kuinka kauan piiriä pidetään suljettuna. Tässä on kuitenkin hyvä käyttää teholtaan riittävän kestävästä vastusta, koska kytkentää ohjataan myös napilla, jolloin pulssimuuntaja voi olla pitempiä aikoja kytkettynä maahan.

## 6.5 Suodatus

Pulssin muotoiluun käytetään suodatinkytkeä, koska koekytken testauksessa kävi ilmi, että kondensaattoriin varattu energia ei riitä nostamaan pulssin huipputähtästä riittävästi. Tästä syystä energiavarastokondensaattoria ja purkausvastusta jouduttiin kasvattamaan. Tämä kuitenkin pidensi pulssinleveyttä liian pitkäksi, joten tähän tarvittiin suodatinkytkeä, joka lyhentää pulssinleveyttä.



Kuvio 23. Suodatinkytkeä

Kytkenässä oleva kela vastustaa virranmuutosta, jolloin sen kytkentähetken resistanssi on suuri (Pelttonen 2007, 48). Resistanssi kuitenkin pienenee, mitä kauemmin virta kasvaa. Tämä virran muutos voidaan laskea kaavalla:

$$I = \frac{V \cdot t}{L} \quad (11)$$

Jännitteen pysyessä vakiona, virta kasvaa kunnes jännite katkaistaan. Tästä voidaan johtaa kaava kelan aiheuttamalle resistanssin muutokselle  $L_R$ :

$$L_R = \frac{V}{\frac{V \cdot t}{L}} \quad (12)$$

Resistanssin muutos kuitenkin vaikuttaa energiavarastokondensaattorilta purkautuvaan jännitteeseen niin, että purkaus nopeutuu ajan funktiossa ja täten pulssin leveys lyhenee. Jännitteen muutos voidaan laskea kaavalla:

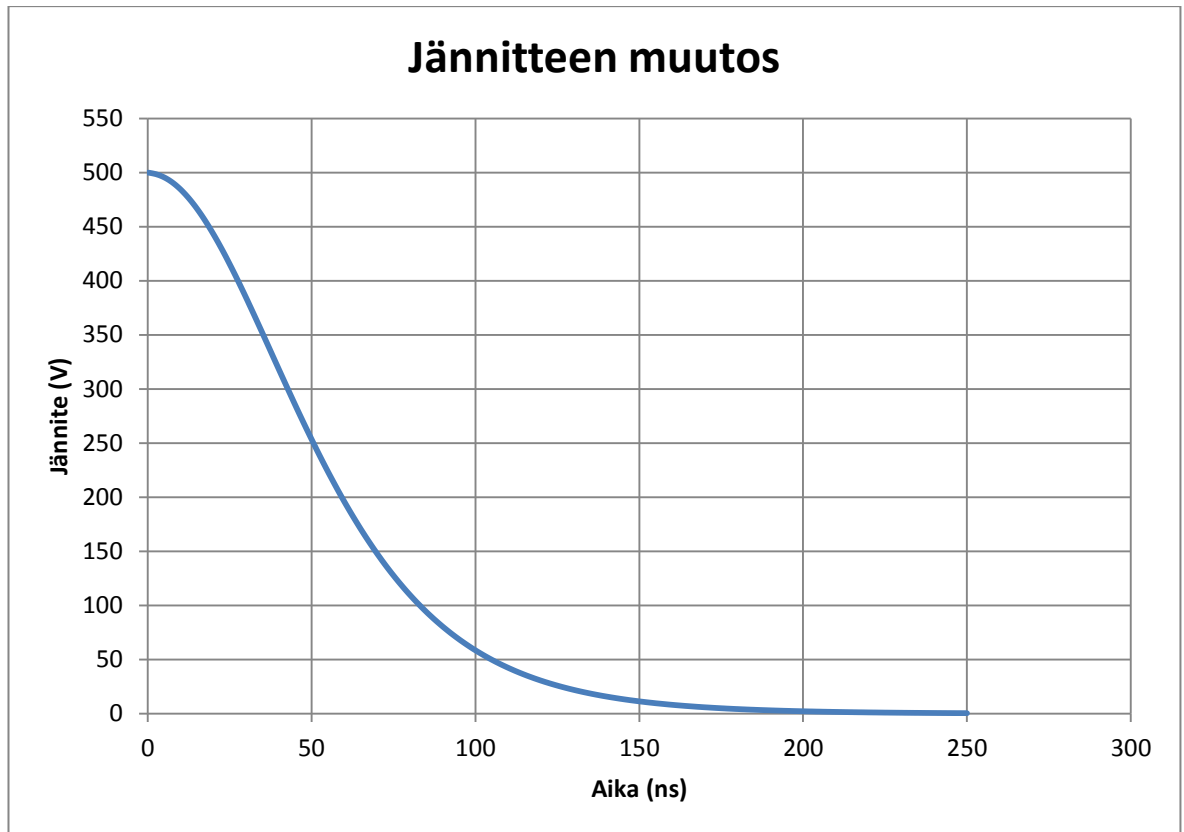
$$V = V_S * e^{-t/T} \quad (13)$$

Kaavassa  $V_S$  on lähdejännite, joka pysyy vakiona, kuten kondensaattorin purkautumisaikaa laskettaessa kaavassa (1). Aikavakiossa  $T$  vaikuttava kytkennän impedanssi muuttuu jännitteen muutoksen myötä. Aikavakiossa vaikuttaa energiavarastokondensaattori ja purkausvastus:

$$T = R * C \quad (14)$$

Aikavakiossa vaikuttava resistanssi  $R$  korvataan suodatinkytken kokonaisimpedanssilla. Kytkennän kokonaisimpedanssi  $Z$  saadaan laskettua kaavalla:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{L_R^2 + R_1^2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2}\right)^2}} \quad (15)$$

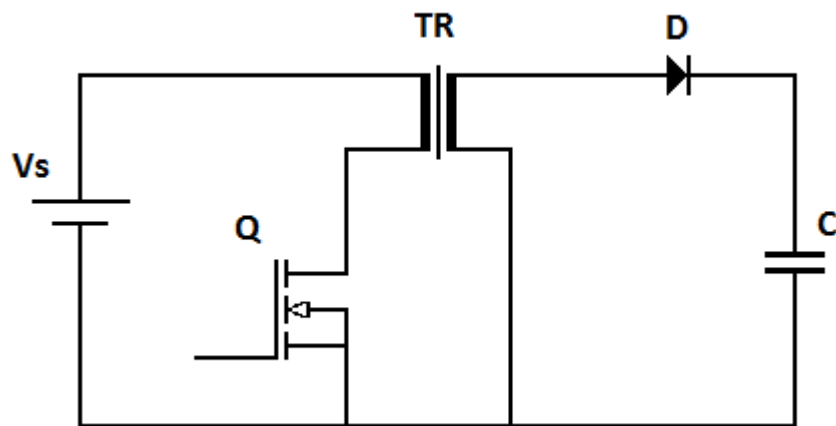


Kuvio 24. Suodatinkytkenän aiheuttama jännitteen muutos ajan funktiossa, energiavarastokondensaattorin purkautumisessa

Laskettaessa käytettiin lähdejännitteenä  $V_S$  maksimijännitettä, kela ( $L$ ) oli  $1 \mu\text{H}$ , sarjavastus  $R_1$  oli  $10 \Omega$  ja rinnakkaisvastuksena  $R_2$  oli  $330 \Omega$ . Kytkenässä olevan diodin vaikutus ei näy tässä laskennassa, mutta diodi toimii kelan energianpurkausdiodina.

## 6.6 Teholähde

Teholähteeksi jännitteen nostamiseen on suunniteltu flyback-hakkurikytkentää. Hakkurilla on tarkoitus nostaa jännite riittävän korkeaksi ja johtaa se energiavarastoon odottamaan liipaisua. Kytkentään tarvittavien komponenttien määrittämiseksi tarvitaan tiedot käyttöjännitteestä, ulostulevasta jännitteestä, sekä virrasta. Lisäksi määritellään kytkentätaajuus, jotta voidaan määritellä kytkimen päälläoloaika. (Varviala 2009, 3.)



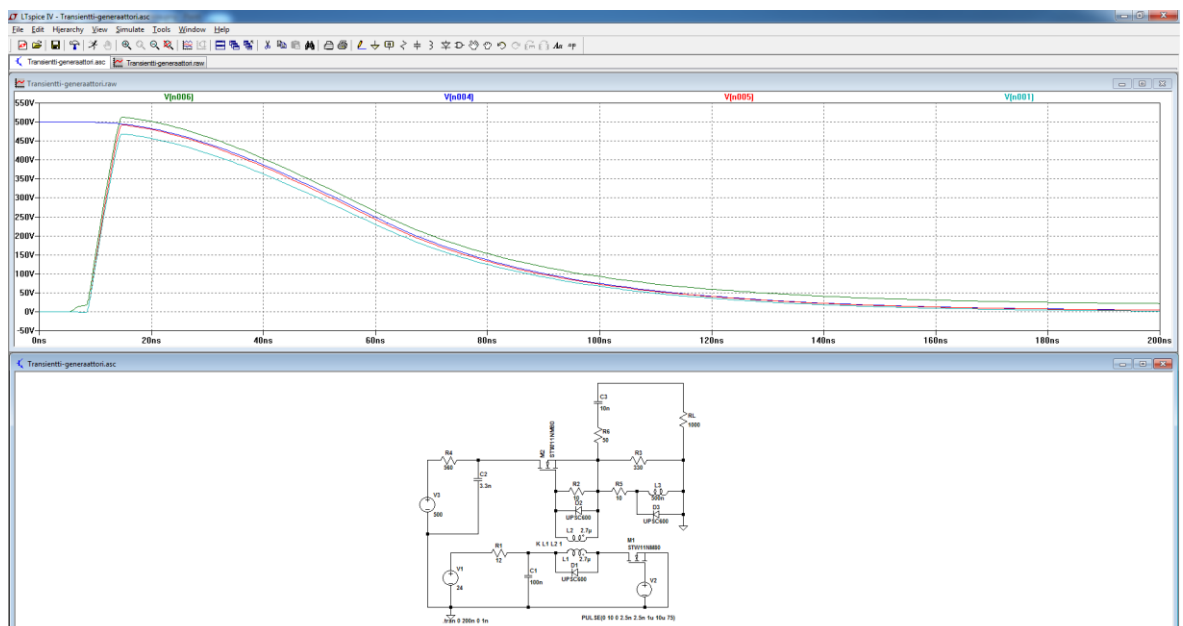
Kuvio 25. Teholähde jännitteen nostamiseksi

Teholähde voidaan toteuttaa itse, jolloin saadaan jännite nostettua riittävälle tasolle (500 V). Teholähde täytyy erottaa transienttikytkenästä jännitteen tasauksen jälkeen. Kytkenä erotetaan suuntausdiodeilla, jotta transientti ei lähde väärään suuntaan.

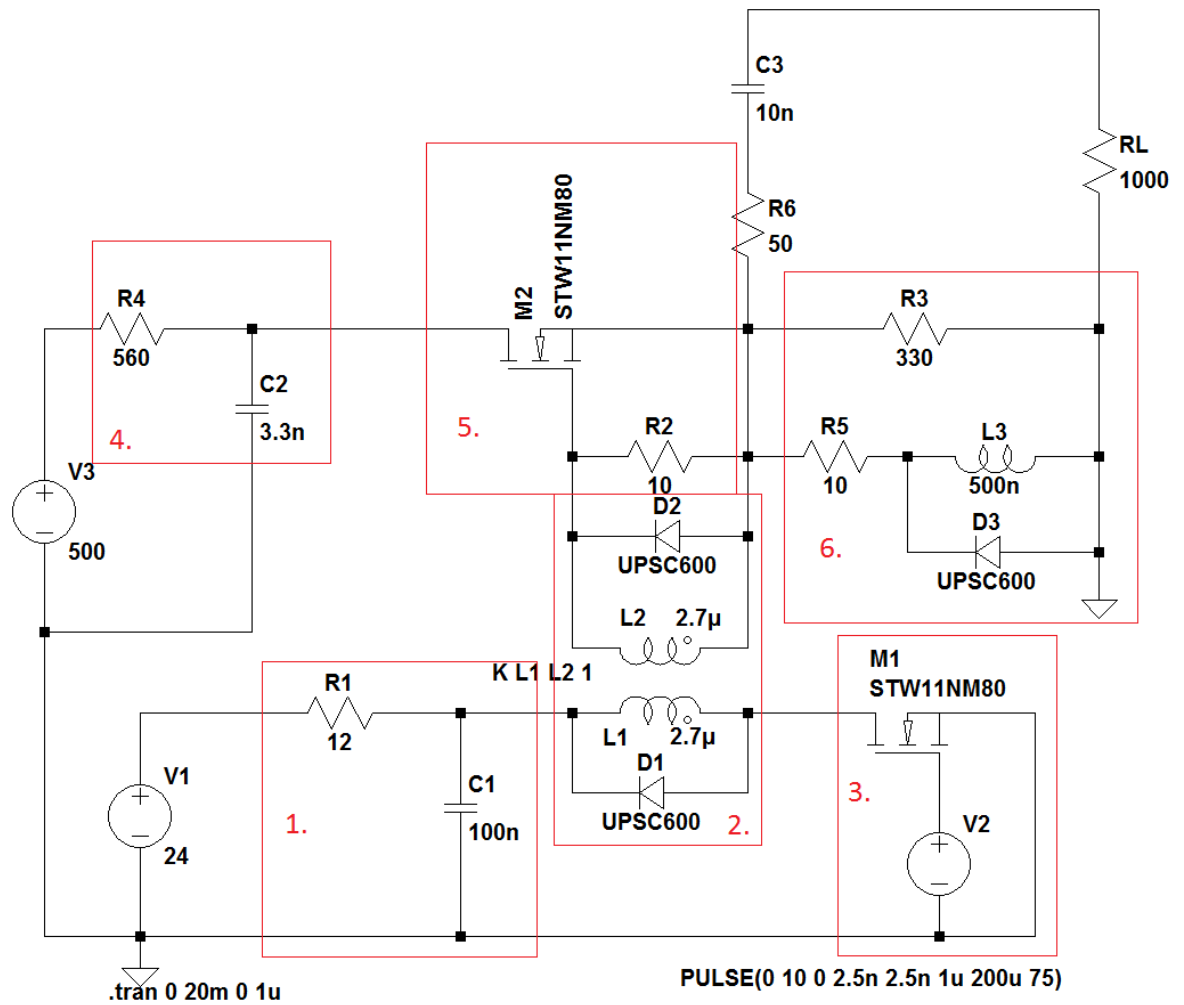
Flyback-muuntajana voidaan käyttää hakkurimuuntajaa, joka on tarkoitettu muuntamaan jännite 230 voltista 5 volttiin. Muuntaja kytketään vain toisinpäin ja syötetään suurempi jännite. Esimerkiksi jos käytetään 12 voltin syöttöjännitettä, niin teoriassa tällä muuntosuhteella saataisiin yli 500 voltin jännite.

## 7 Kytkennän simulointi

Tässä osiossa käsitellään kytkennän simulointia LTSpice-ohjelmalla ja testataan kytkentäteorian toimivuus, ennen kuin rakennetaan koekytkentää. Simulointi auttaa parantamaan kytkennän suunnittelua ja tarkentamaan komponenttiarvoja. Simulointiohjelma osaa piirtää hyviä kuvia jännitteen muutoksista. Tässäkin kannattaa muistaa, ettei laita liian montaa mittapistettä kerralla, jotta kuva pysyisi selkeänä. Kytkentä kannattaakin mitata osissa, eli aloittaa esimerkiksi ohjauksesta kun-  
ka se toimii ja onko ongelmia.



Kuvio 26. Kytkennän simulointinäkymä LTSpice-ohjelmassa



Kuvio 27. Kytkennän jakaminen osiin simulointia varten

Kuviossa 27 kytkentä on jaettu simuloitaviin osiin, missä numeroidut osat ovat:

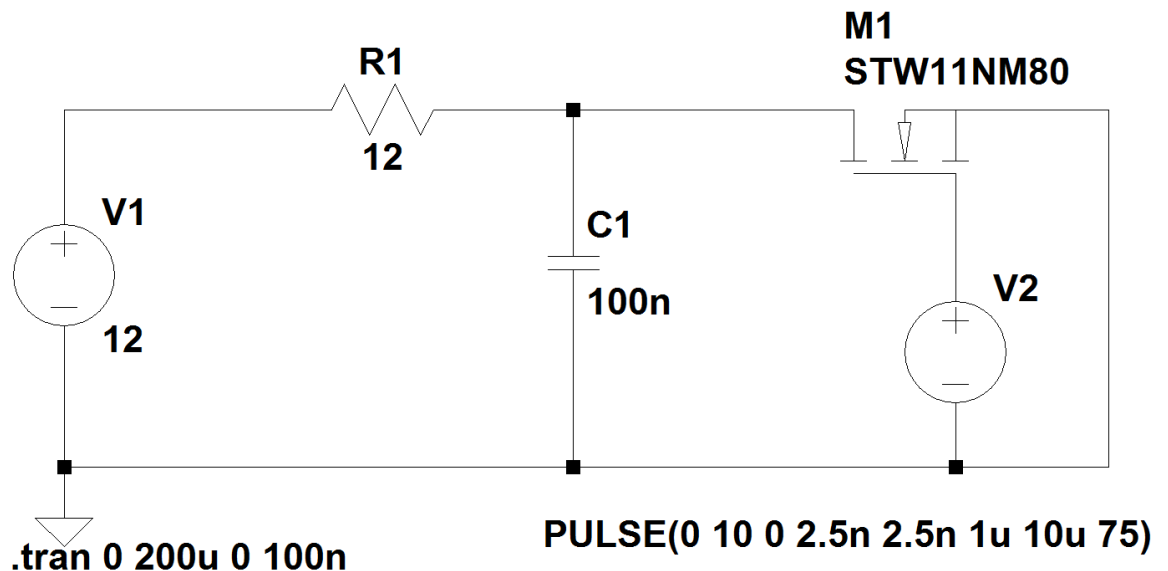
1. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattori ja latausvastus
2. Pulssimuuntaja ja tarvittavat energianpurkudiodit
3. Pulssimuuntajan ohjaamiseen käytettävä mosfet-kytkin
4. Suurjännitteen energiavarastokondensaattori ja latausvastus
5. Liipaisussa käytettävä mosfet-kytkin ja hila-lähdevastus
6. Pulssinleveyteen vaikuttava suodatinkytkentä

## 7.2 Ohjaus

Ohjauskytkentä käsittää käyttäjän manuaalisen ohjauksen napilla, liitännän signaaligeneraattorille, jännitteen mittauksen sekä säädön teholähteen tuottaman jännitteen säätämiseksi. Simuloinnissa ohjaus on korvattu pulssijännitelähteellä, jolla ohjataan pulssimuuntajan mosfetia. Pulssijännitelähde vastaa tässä simuloinnissa signaaligeneraattoria.

## 7.3 Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattori

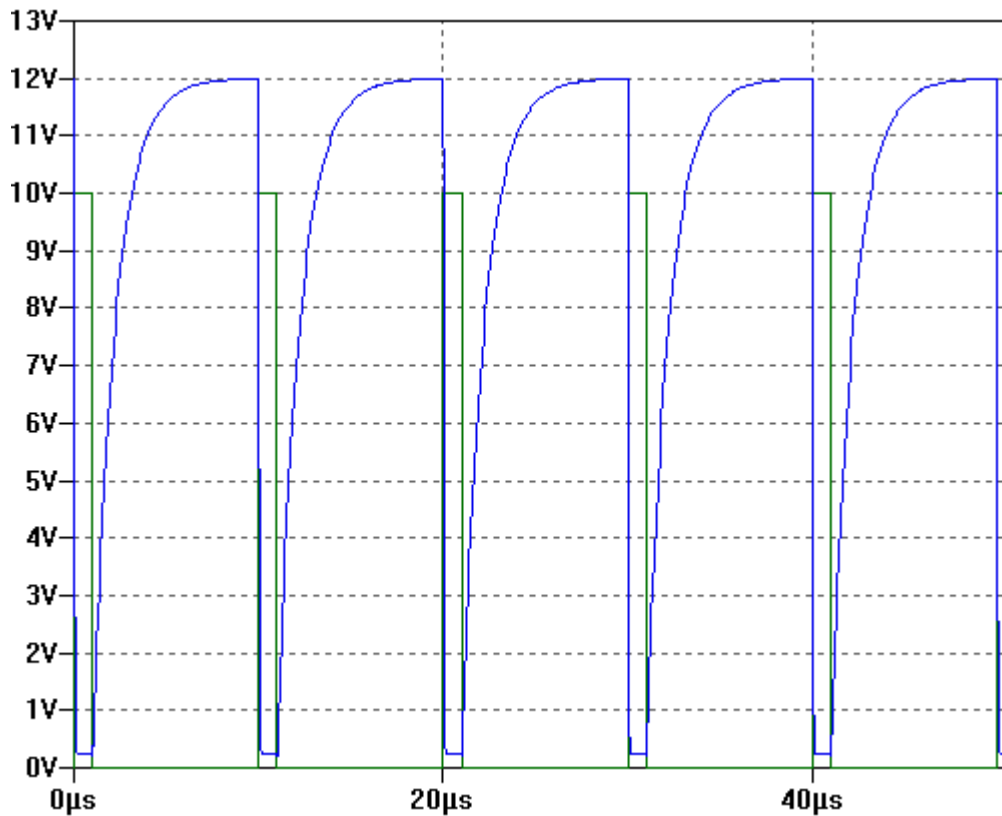
Pulssimuuntajakytkennässä on kondensaattori energiavarastona, joka purkautuu pulssimuuntajan ensiökäämin läpi, kun ohjaus kytkee mosfetin johtavaksi. Kytkennästä simuloidaan kondensaattorin latautuminen ja purkautuminen, että tiedettäisiin pysyykö se tuon nopeimman taajuuden tahdissa.



Kuvio 28. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattori

Kytkenästä mitataan referenssinä mosfetin hilalta ohjaussignaalin jännite ja kondensaattorin ja latausvastuksen liitoksesta lataus- ja purkausjännite.





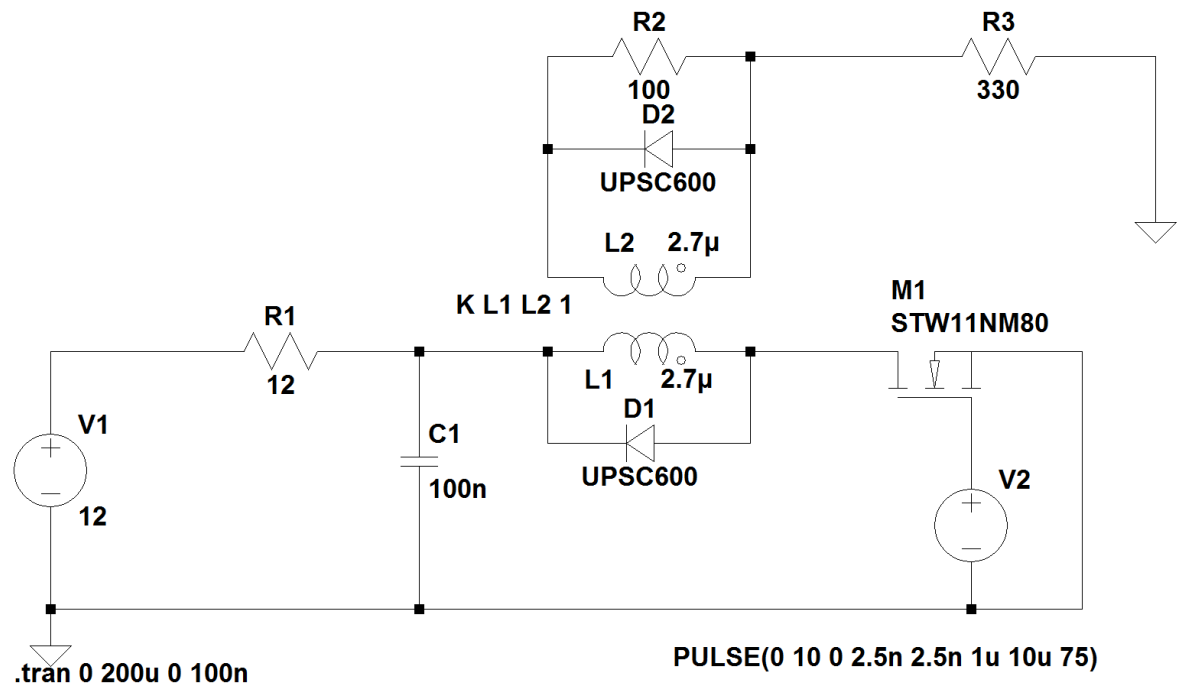
Kuvio 29. Pulssimuuntajan energiavarastokondensaattorin latautuminen ja purkautuminen

Mittauskuvasta havaitaan, että kondensaattori ehtii latautua ja purkautua täysin. Seuraavaksi kytkentään lisätään pulssimuuntajan ensiökäämi, jolloin nähdään sen vaikutus purkautumiseen.

## 7.4 Pulssimuuntajan simulointi

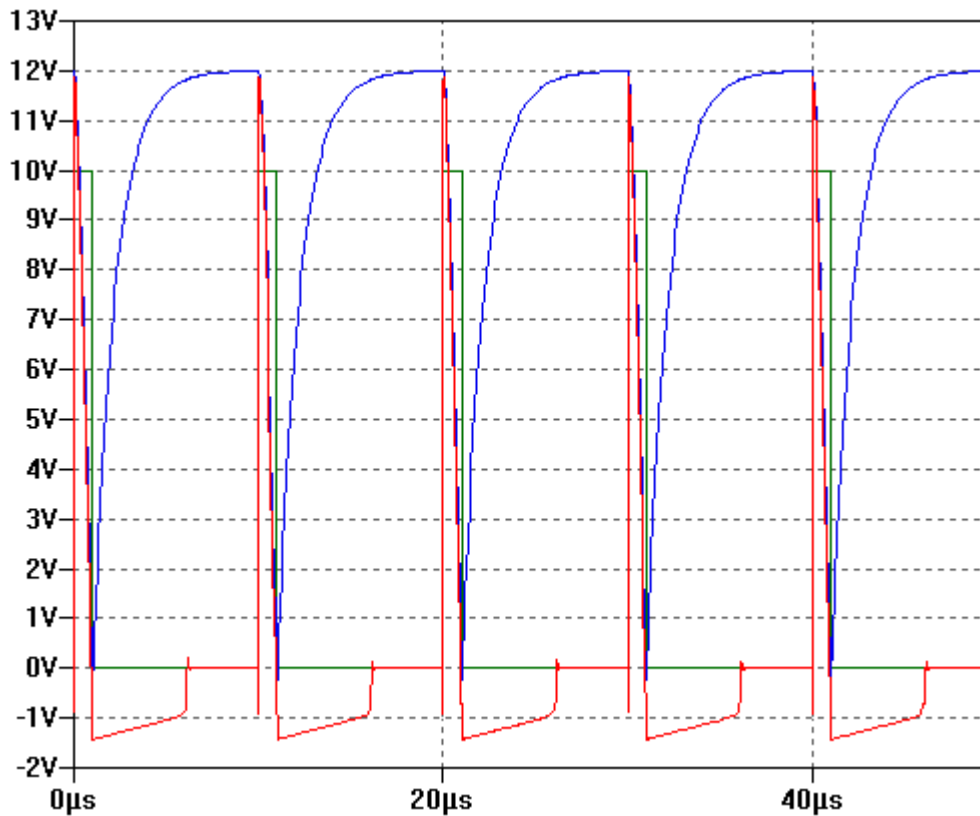
Kytkenästä simuloidaan kondensaattorin ja latausvastuksen toiminta niin, että nähdään toimiiko kytkentä tuolla nopeimmalla taajuudella, eli standardin määrittelemällä 100 kHz:n taajuudella.

Mosfet-transistorin ohjaukselle käytettävään pulssilähteeseen asetetaan jännitteen amplitudiksi 10 V, päälläoloajaksi 1  $\mu$ s, jaksonajaksi 10  $\mu$ s, nousu- ja laskuajaksi 2,5 ns ja toistoja 75 kpl.



Kuvio 30. Pulssimuuntajan simulointikytkentä

Kytkenästä otetaan referenssimittaukseksi ohjaus-mosfetin hilajännite, sekä kondensaattorin ja latausvastuksen liitoskohta. Ohjelma antaa tulokseksi jännitekuvaajan, joka vastaa oskilloskooppikuvaa. Mittaus on otettu 200  $\mu$ s:n ajalta.

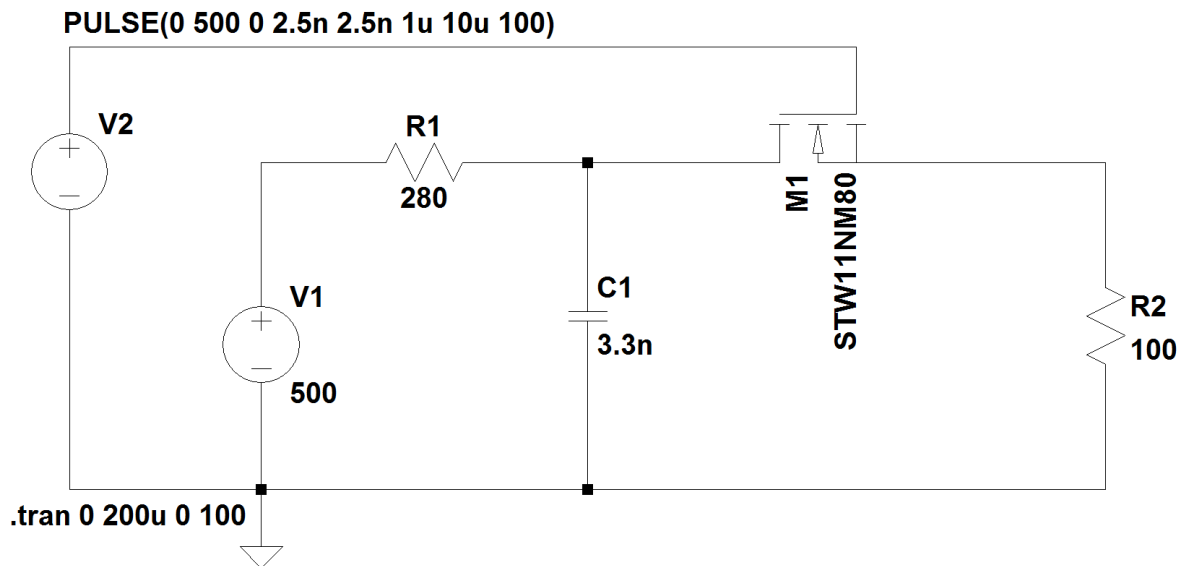


Kuvio 31. Pulssimuuntajan simulointi

Kuviossa 31 vihreä signaali on mosfetin hilajännite eli ohjauspulssi, sininen on kondensaattorin lataus- ja purkausjännitteen kuvaaja ja punainen on pulssimuuntajan toisiokäämin jännite.

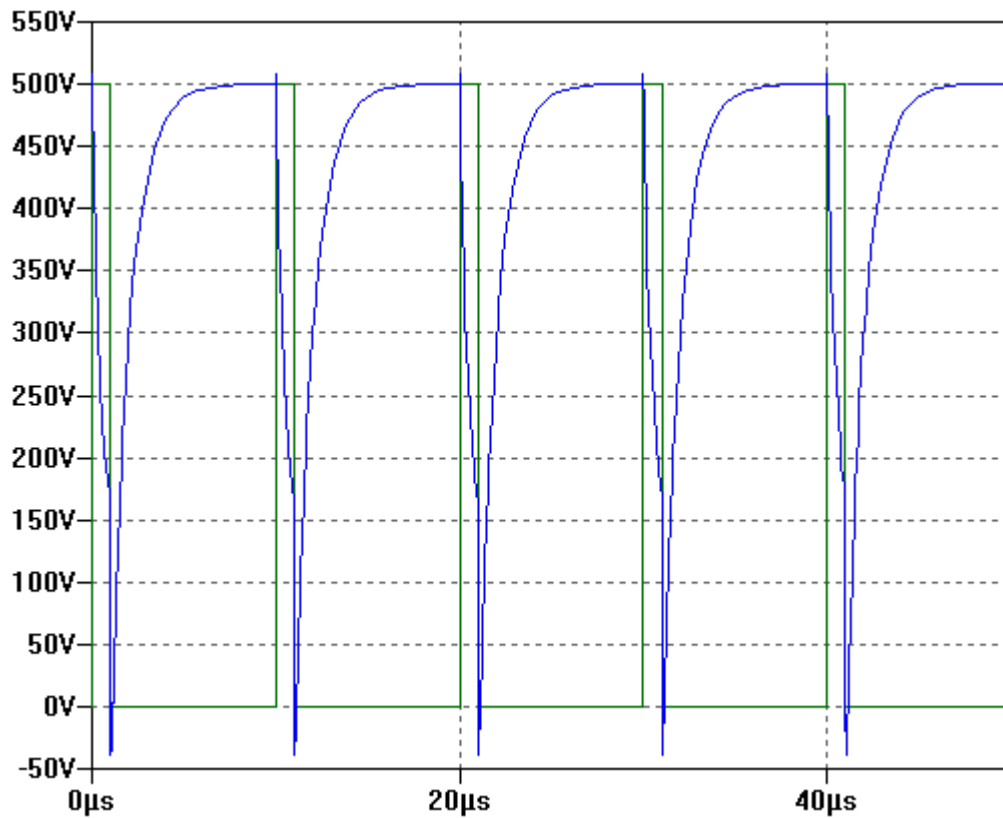
## 7.5 Suurjännite energiavarastokondensaattori

Transienttipiikin tuottava energiavarastokondensaattori tarvitsee latausvastuksen, jonka resistanssi määritellään tuon nopeimman toimintataajuuden mukaan. Tässä pitää ottaa huomioon suurempi käyttöjännite sekä tehontarve.



Kuvio 32. Suurjännite energiavarastokondensaattorin latausvastuksen simulointi-  
kytkentä

Kytkenässä mosfetin ohjaukseen käytetään pulssilähdettä, jonka jännitteen amplitudi on 500 voltia, nousu- ja laskunopeus 2,5 ns, päälläoloaika 1 us ja jaksonaika 10 us.

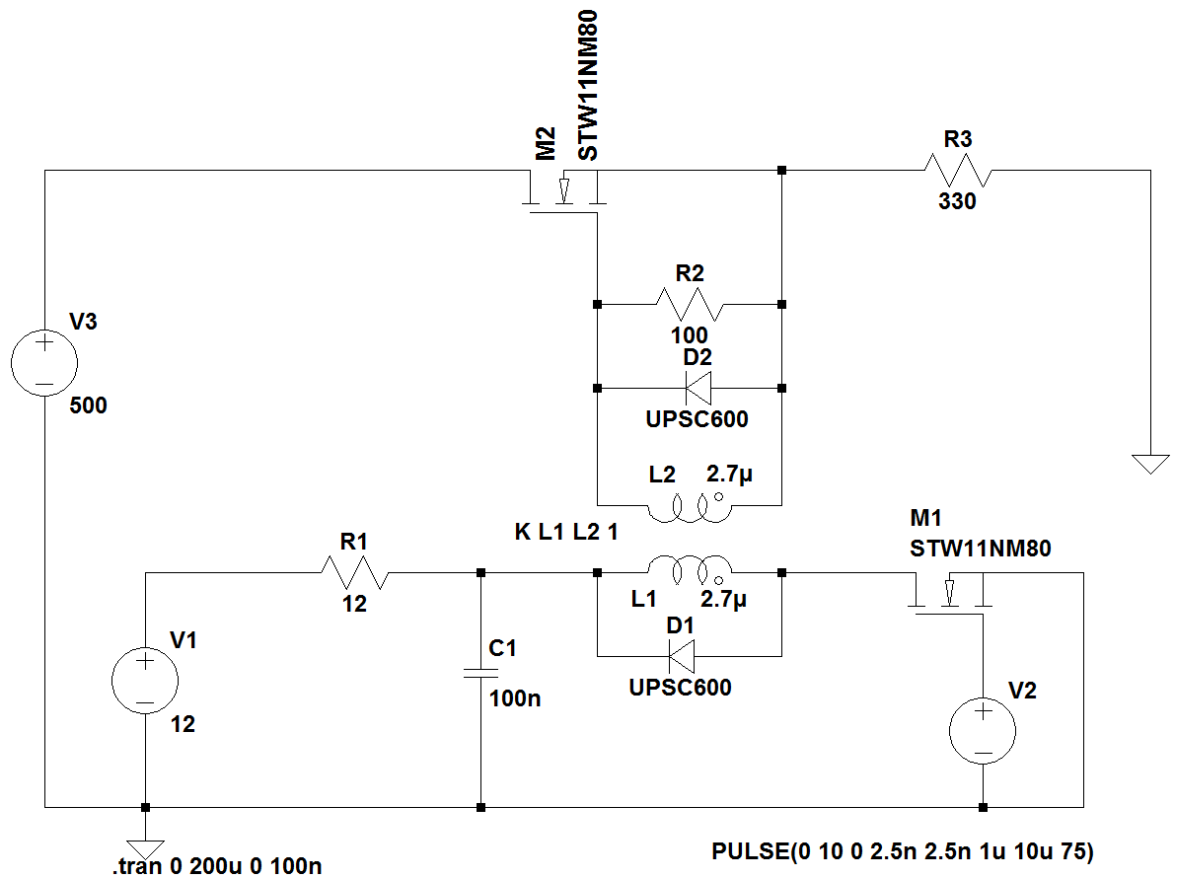


Kuvio 33. Energiavarastokondensaattorin latautuminen ja purkautuminen

Mittauksessa vihreä signaali on mosfetin hilalle tuleva ohjauspulssi ja sininen on energiavarastokondensaattorin latautumisen- ja purkautumisenjännite. Simuloinnista nähdään, että kondensaattori ehtii latautua ja purkautua riittävän nopeasti.

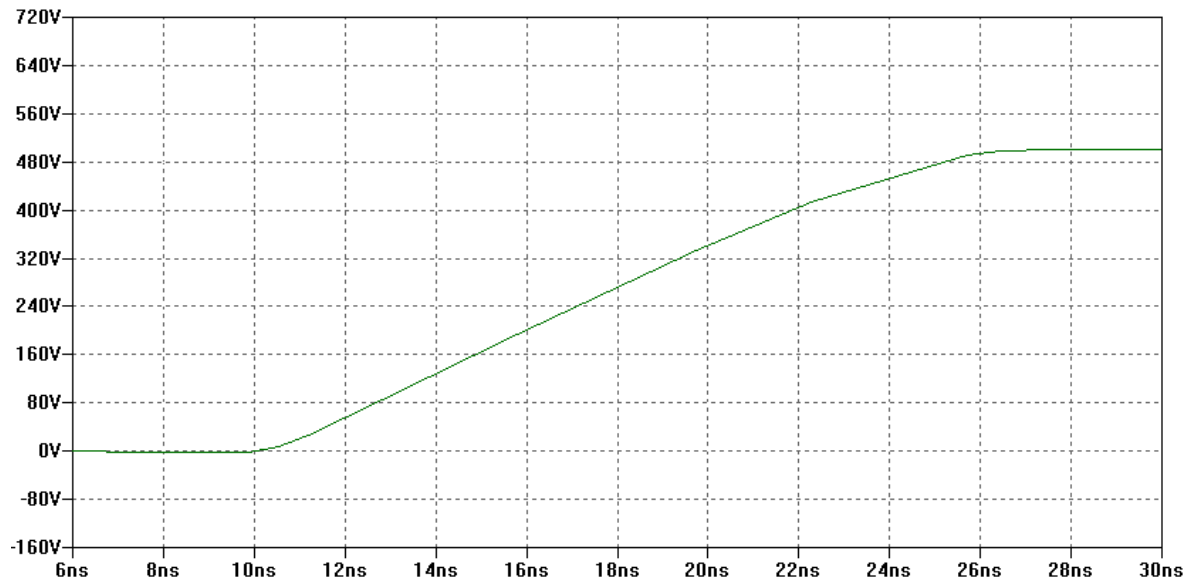
## 7.6 Liipaisun simulointi

Liipaisun simuloinnissa kokeillaan yhdistää pienjännitepuolella toimiva pulssimuuntajakytkentä suurjännitepuolella liipaisuun käytettävään mosfetiin. Simuloinnissa tarkastellaan liipaisunopeutta eli avautuuko mosfet tarpeeksi nopeasti, jotta päästäisiin tuohon tarvittavaan 5 ns:n nousureunan nopeuteen.



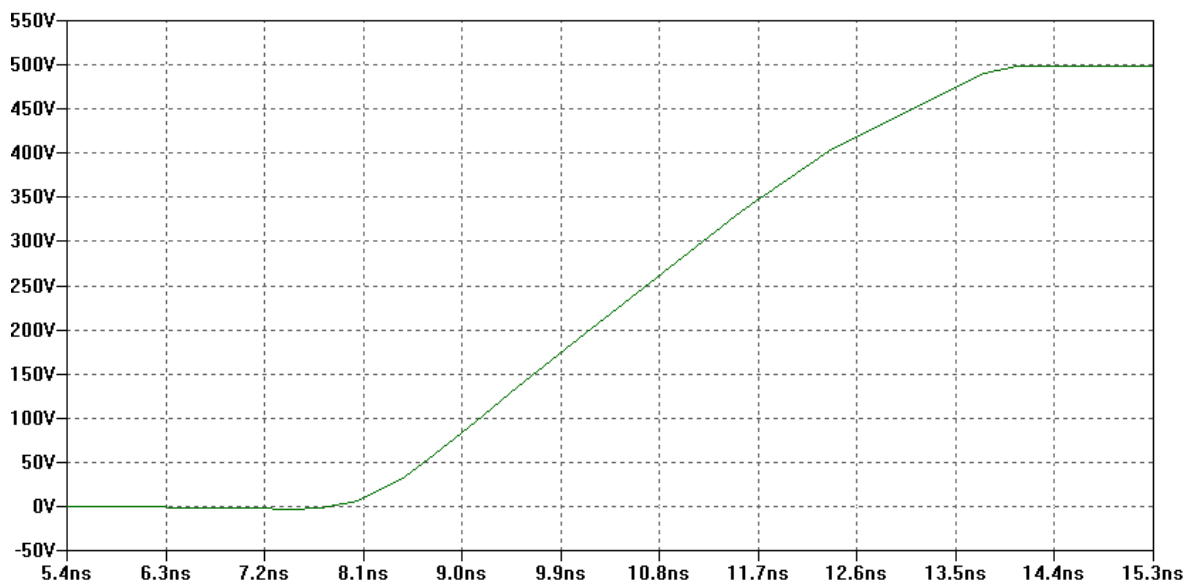
Kuvio 34. Pulssin nousureunan simulointikytkentä

Kyt kentäsimuloinnissa kokeillaan liipaisuun käytettävän mosfetin ohjausta pulssi-  
muuntajalla eli kytkeytyykö mosfet M2 samaa tahtia päälle ja pois, kun mosfet-  
transistoria M1 ohjataan päälle ja pois.



Kuvio 35. Nousureunan simulointimittaus

Kuviosta 35 voidaan huomata, että jännitteellä kestää n. 12 ns nousta, kun tarkastellaan sitä väliltä 10 – 90 %. Tämä johtuu siitä, että liipaisuun käytettävälle mosfetille hilan ohjausenergia ei ole riittävän suuri.

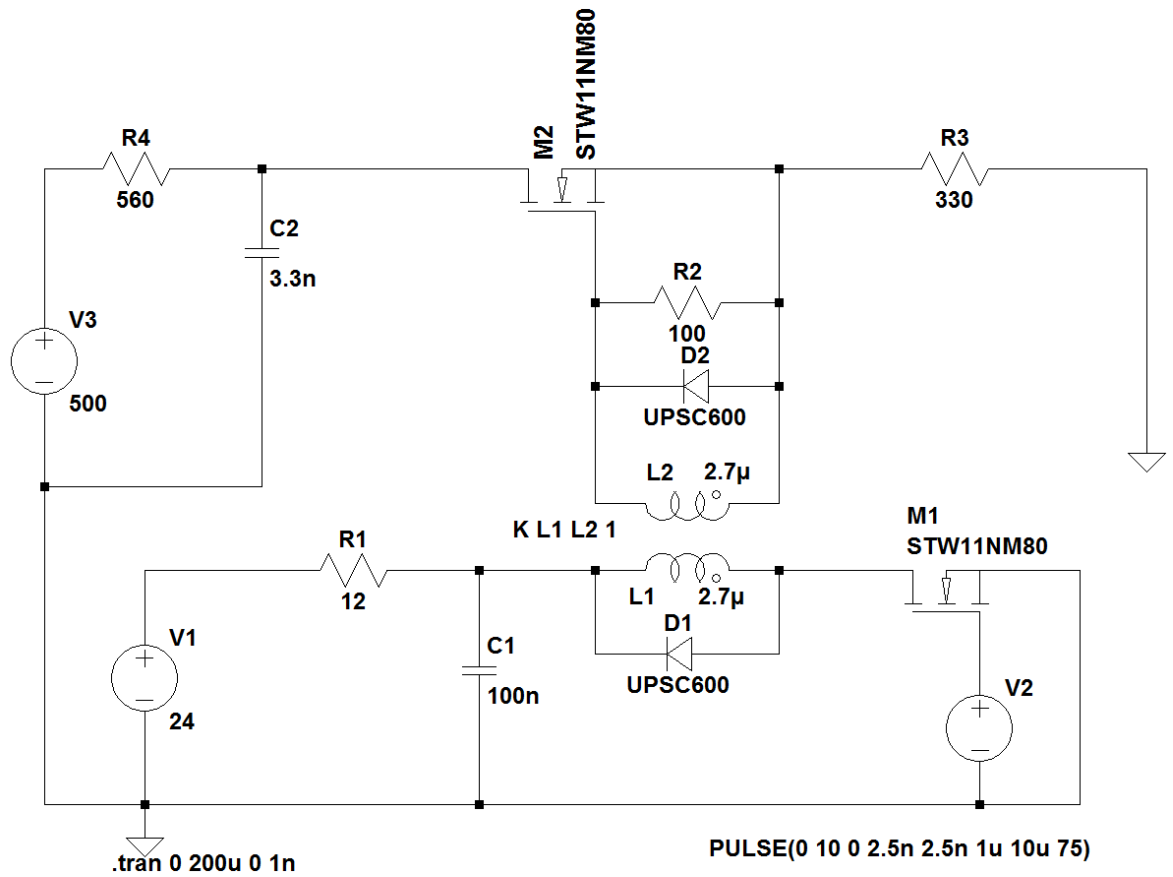


Kuvio 36. Nopeamman nousureunan simulointimittaus

Kun pulssimuuntajan läpi kulkevaa jännitettä nostetaan 24 V, niin nouseva reuna jyrkkenee huomattavasti.

## 7.7 Pulssinmuotoilu

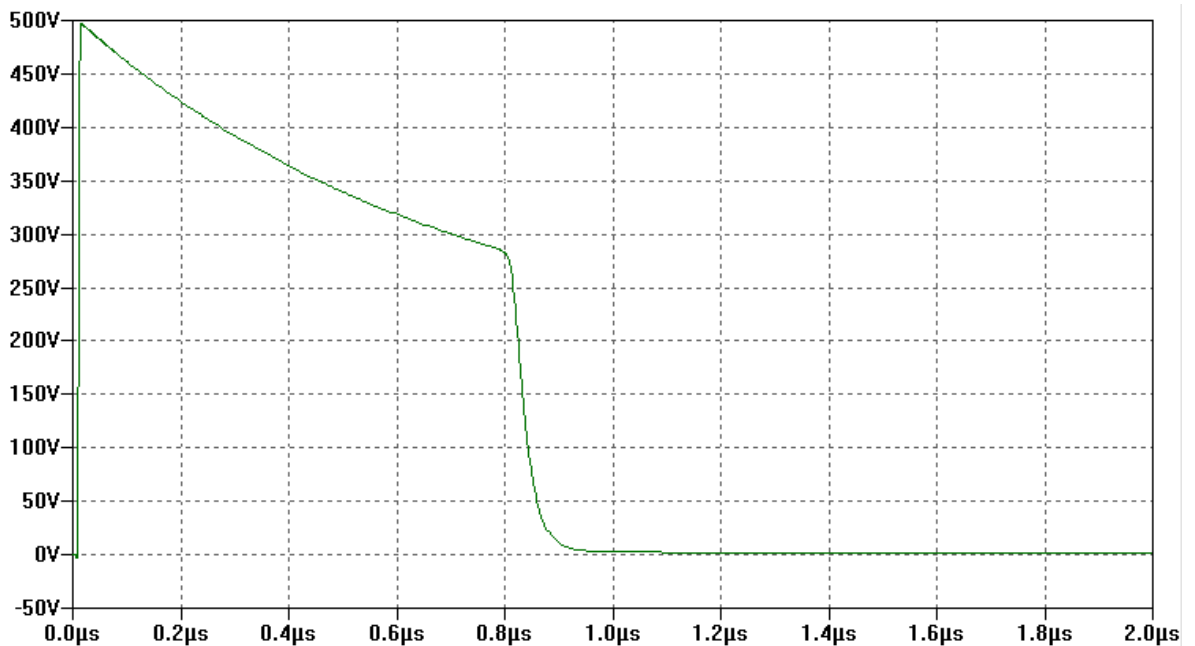
Pulssinkesto eli pulssinleveys määräytyy energiavarastokondensaattorin ja purkausvastuksen mukaan.



Kuvio 37. Pulssinmuotoilukytkentä

Purkausvastus R3 määräytyy edellisten käytännön testien perusteella. Käytännön testeissä kävi ilmi, jotta arvoltaan liian pienen energiavarastokondensaattorin C2 ja purkausvastuksen R3 yhdistelmä aiheuttaa sen, että jännite ei ehdi saavuttaa huippuarvoaan. Tämä johtui siitä, että kondensaattori purkautui liian nopeasti.

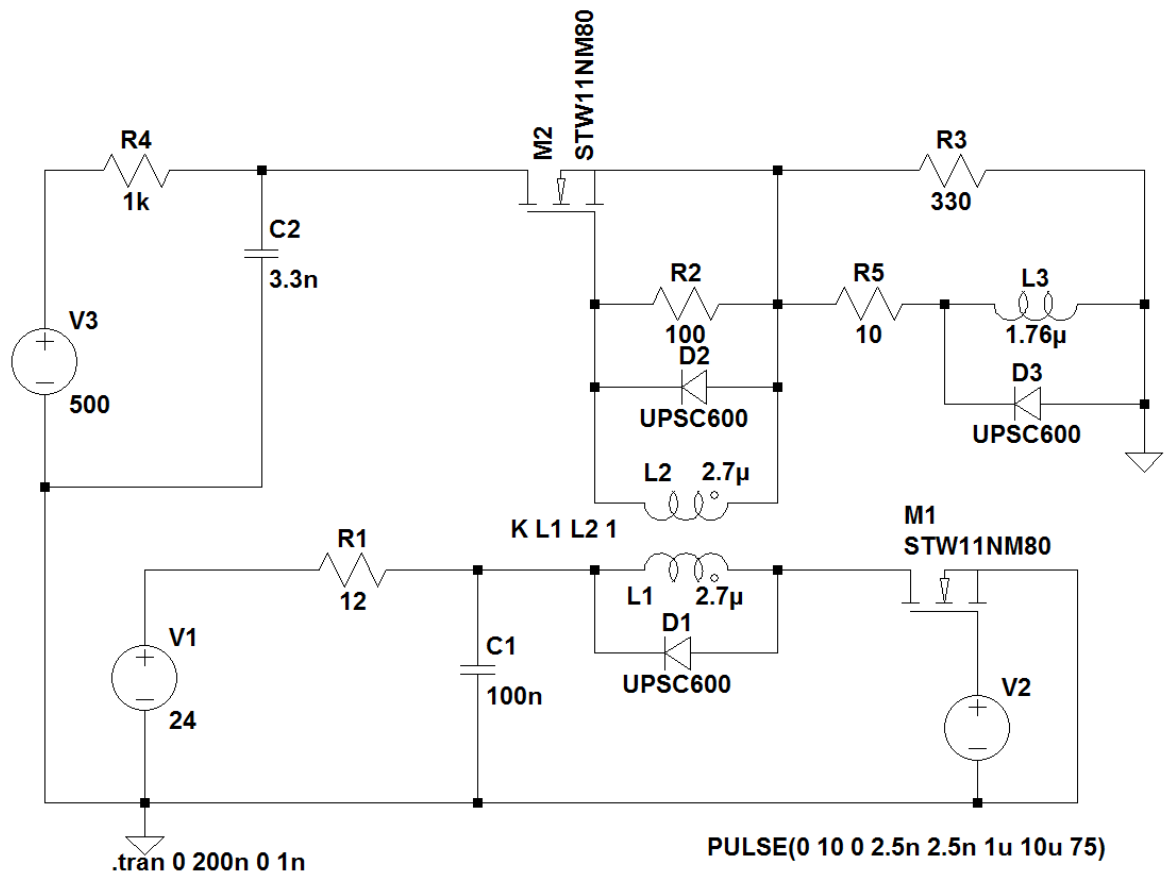




Kuvio 38. Pulssinmuotoilun simulointimittaus

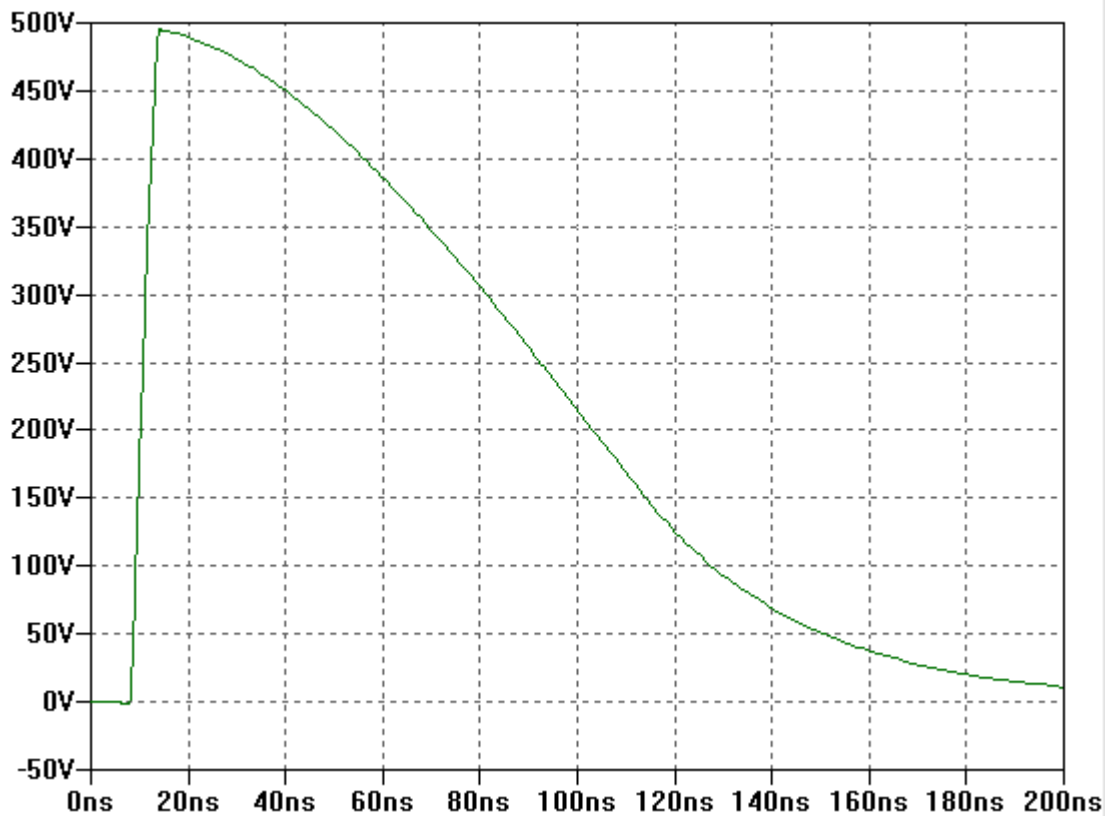
Pulssi venyi lähes yhtä leveäksi kuin ohjauksen päälläoloaika eli 1  $\mu\text{s}$ . Tästä syystä kytkentään tarvittiin suodatinkytkentä, joka lyhentää pulssinleveyttä riittävästi.

Pulssinmuotoilukytkentää paranneltiin käytännön testauksen jälkeen, kun testauksessa osoittautui, että energiavarastokondensaattori on kapasitanssiltaan liian pieni. Lisäksi purkausvastusta jouduttiin myös suurentamaan, ettei kondensaattori purkaudu liian nopeasti. Koska kapasitanssia ja purkausvastusta suurentaessa pulssinleveys venyi liikaa, siihen päätettiin lisätä suodatinkytkentä, joka lyhentää pulssinleveyttä.



Kuvio 39. Paranneltu pulssinmuotoilukytkentä

Kytkentään lisättiin kela L3 ja sarjavastus R5 sekä kelan rinnalle diodi D3 kelan energian purkamiseen ja pienentämään negatiivista jännitettä. Tämä kytkentä muodostaa tarvittavan suodatinkytkennän, joka lyhentää pulssinleveyttä.

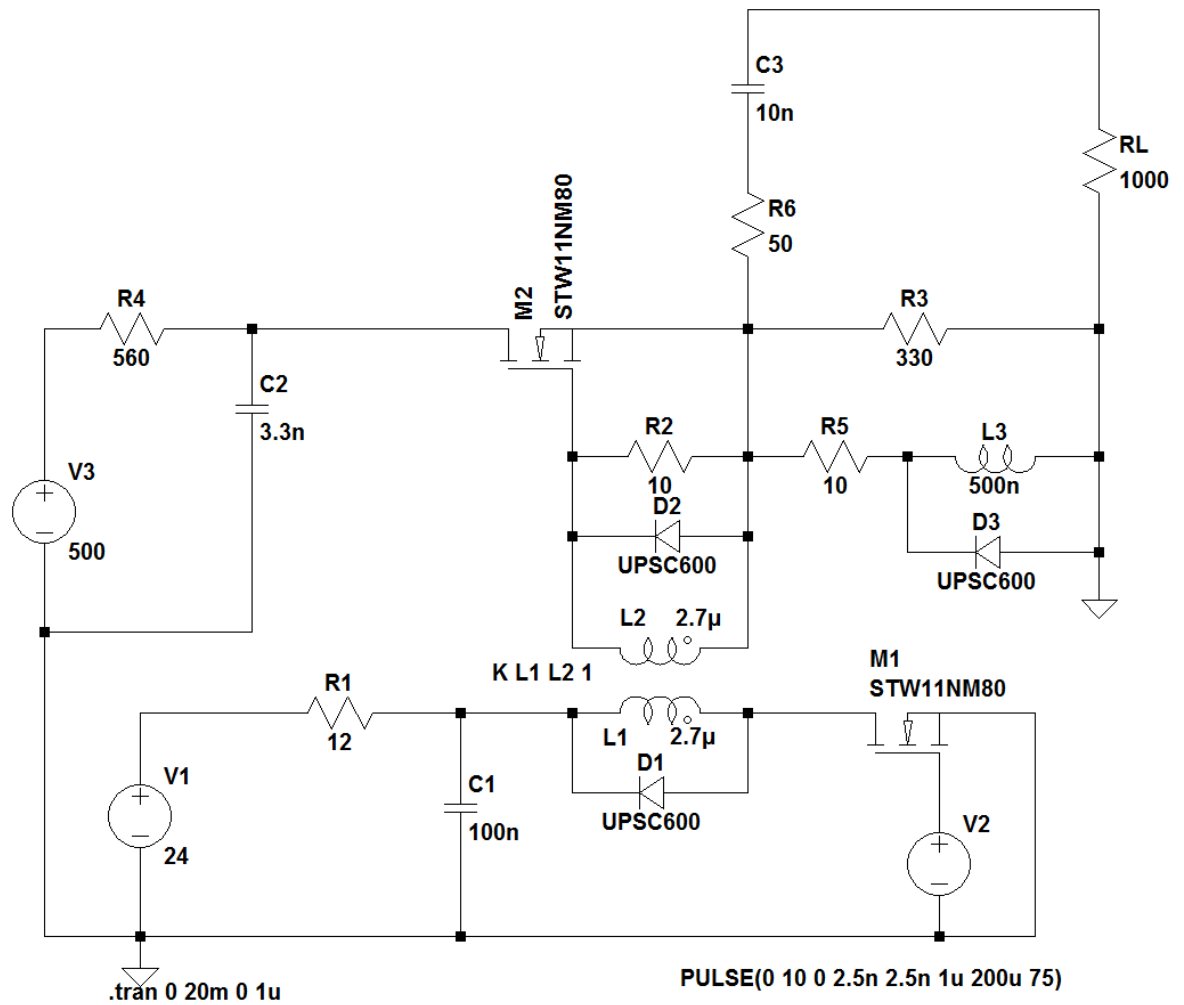


Kuvio 40. Parannellun pulssinmuotoilukytken simuloitimitaus

Kuviosta 40 voidaan nähdä, että pulssi on vielä aika leveä, mutta leveys on standardin määrittelyn sisällä.

## 7.8 Koko kytkennän toiminnallinen simulointi

Tässä simuloidaan koko kytkentä ja ulostuleva transienttipurske, pulssimuodot ja jännitehuiput standardin määrittelemillä kuormilla. Ensin simuloidaan purske 5 kHz:n taajuudella, sekä 100 kHz:n taajuudella, jolloin nähdään pysyvätkö jännitehuiput vakiona koko purskeen keston ajan.

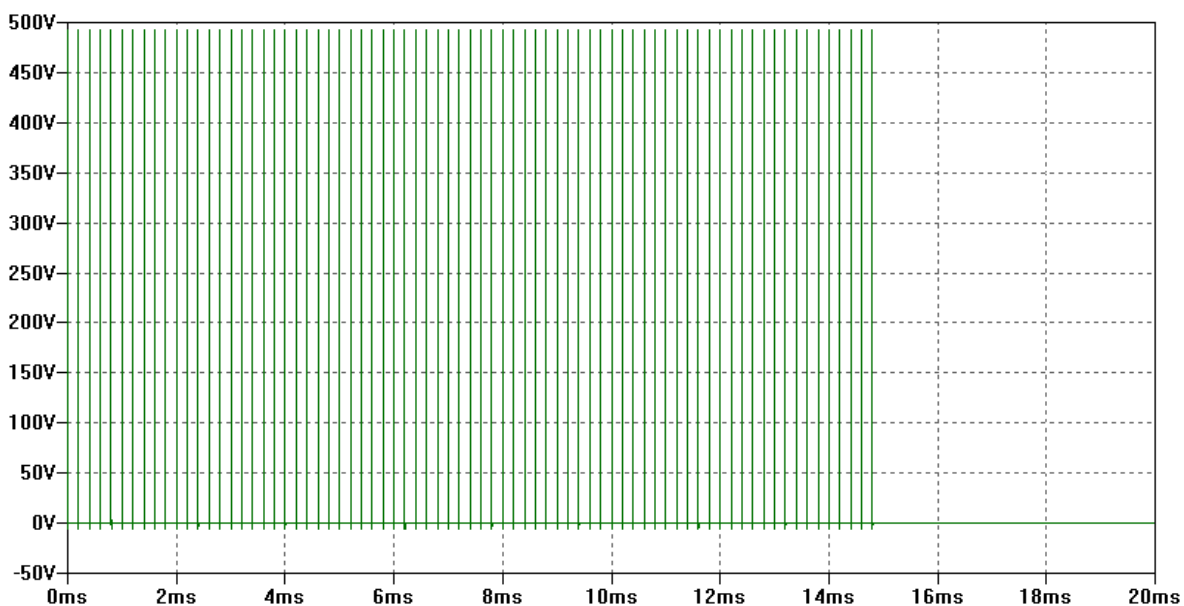


Kuvio 41. Kokokytkennän simulointi

Kytkenäsimuloinnissa on jonkin verran tarkennettu komponenttiarvoja simuloinnin perusteella.

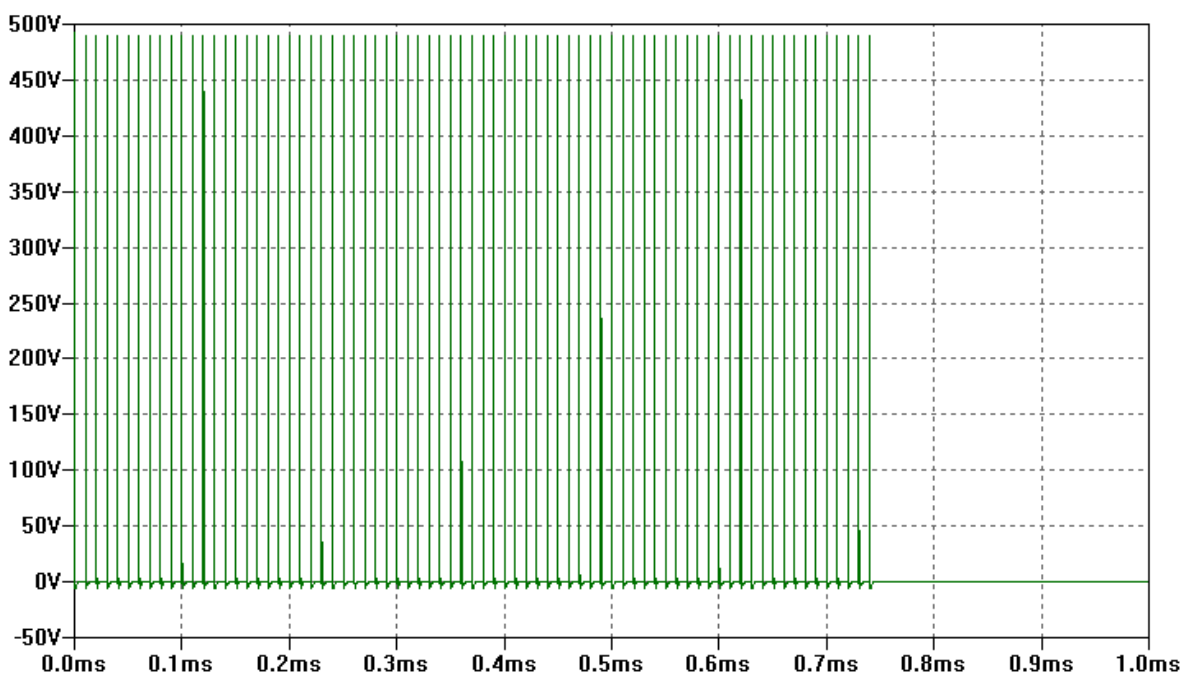
Liipaisuun käytettävän mosfetin hilan ja lähteen välille liitettävä vastus R2 on simuloinnissa  $10\ \Omega$ . Kyseinen vastus vaikuttaa jännitteen pulssin nousevan reunan yläosaan eli kuinka loivasti jännite tasaantuu. Liian suuri tai pieni vastus loiventaa reunaa liikaa.

Suodatinkytkennässä kela L3 on pienennetty arvoltaan 500 nH, koska simuloinnin perusteella pulssin leveys on muuten liian pitkä.



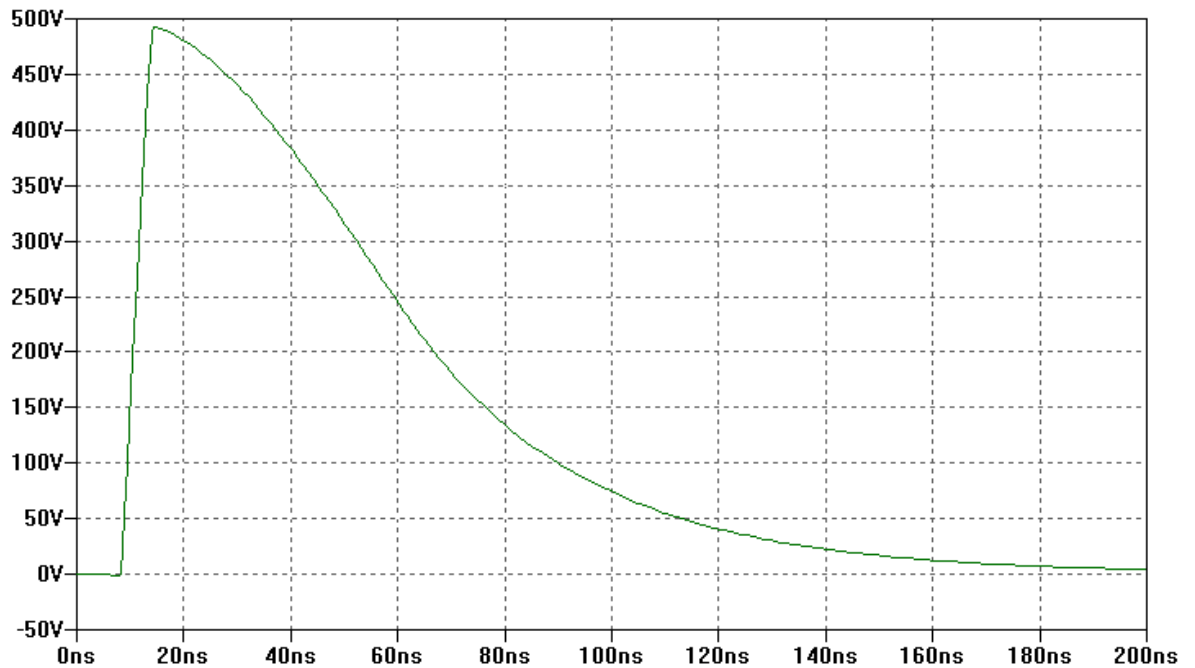
Kuvio 42. 5 kHz:n purske

Simuloinnista havaitaan, että purskeen sisältämät yksittäiset pulssit pysyvät tasaisina, eikä jännitteessä näy notkahduksia. Purskeen kesto on n. 15 ms, niin kuin se standardissa määriteltiin.



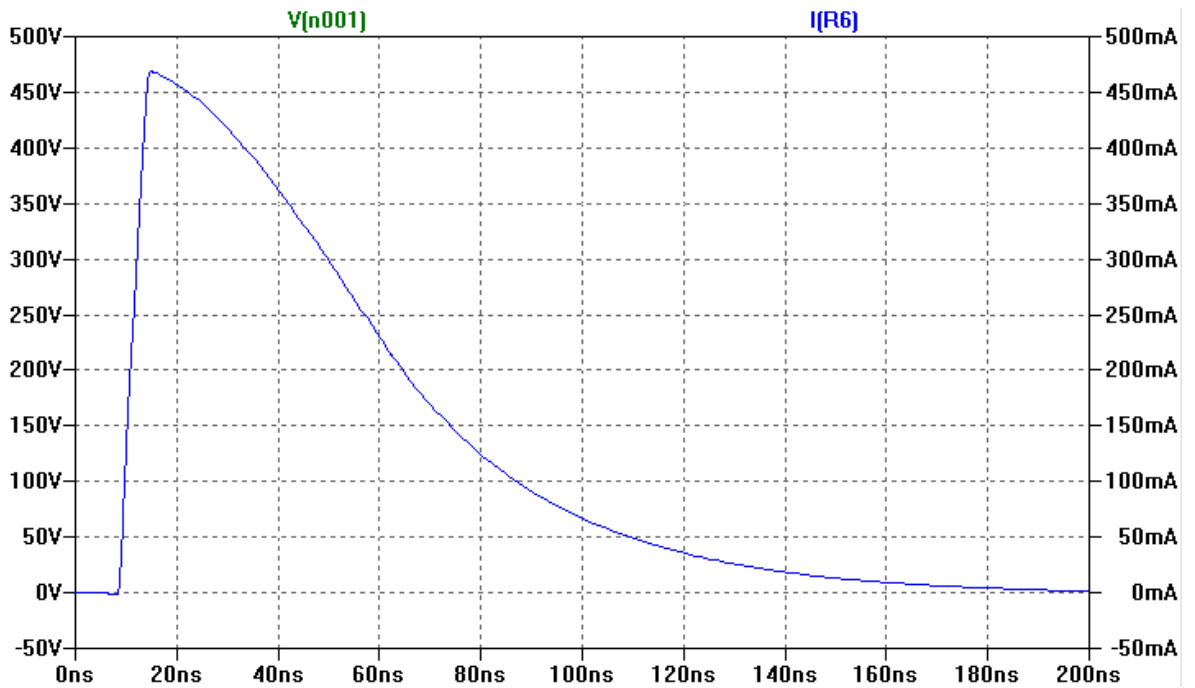
Kuvio 43. 100 kHz:n purske

Nopeammassakin simuloinnissa purskeen sisältämät yksittäiset pulssit pysyvät tasaisina, eikä jännitteessä näy notkahduksia. Tässäkin purskeen kesto on standardin määrittelemä 0,75 ms.



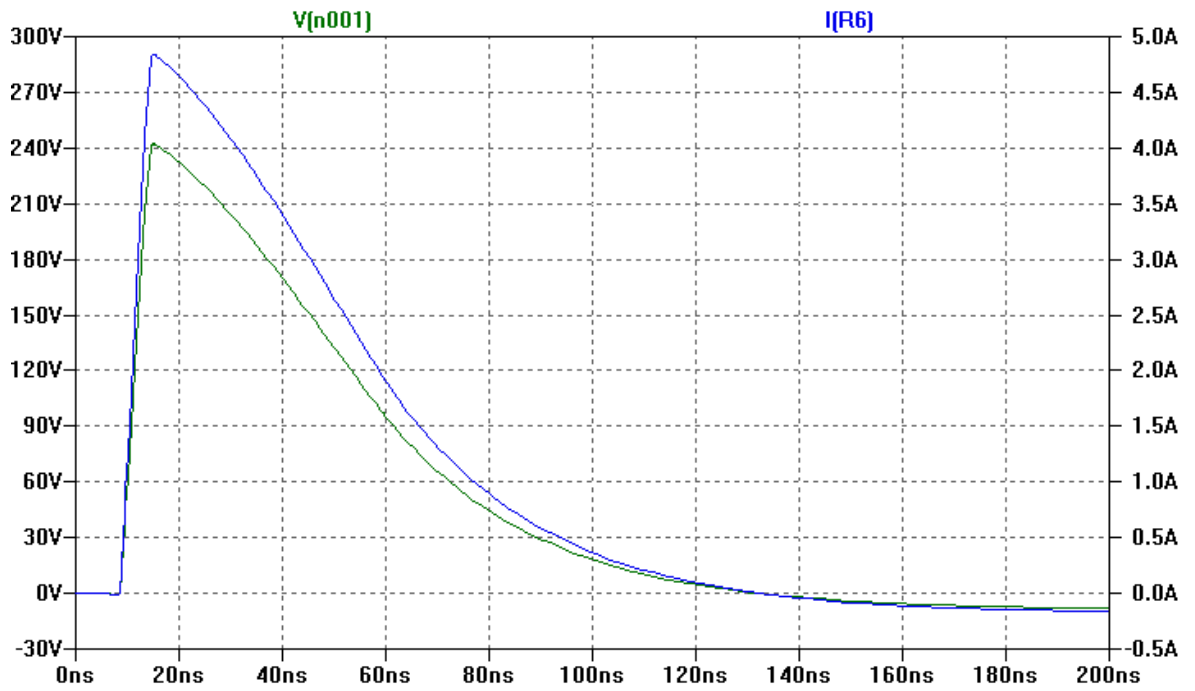
Kuvio 44. Yksittäinen pulssi ilman kuormaa

Yksittäisen pulssin simuloinnissa havaitaan, että pulssi vastaa hyvin standardin määrittelemää pulssinmuotoa. Simulointi on tehty ilman kuormaa.



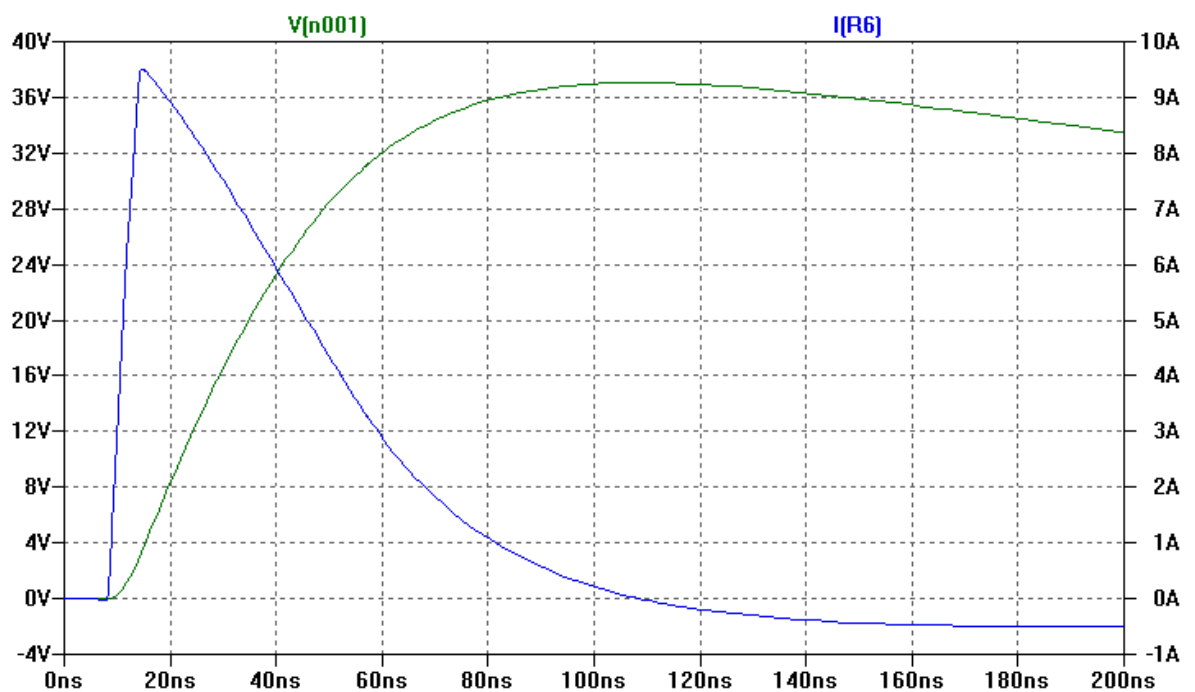
Kuvio 45. Yksittäinen pulssi 1000  $\Omega$ :n kuormalla

Kuviossa 45 on otettu myös virranmittaus, ja kuten kyseisestä kuviosta havaitaan virran kuvaaja (sininen) on samanmuotoinen kuin jännitteen kuvaaja (vihreä). Lisäksi havaitaan, että jännitteen huippuarvo on hiukan laskenut ilman kuormaa tehtävästä simuloinnista.



Kuvio 46. Yksittäinen pulssi 50  $\Omega$ :n kuormalla

Tässä simuloinnissa huomataan, että jännitteen kuvaaja (vihreä) on 10 voltia pienempi kuin standardissa on määritely.



Kuvio 47. Virtapulssi oikosulkusimuloinnissa



Kuviosta 47 huomataan, että virran rajoitusvastus rajoittaa virtapulssin huippuarvon lähdejännitteen mukaisesti n. 9,5 ampeeriin. Virran laskiessa jännite kohoaa hieman, mutta tämä on todennäköisesti simulointiohjelman ominaisuus.

## 8 Kytkenän toteutus

Kytkenää suunniteltiin teorian ja simuloinnin pohjalta. Aluksi käydään läpi komponenttivalintoja ja yksittäisten komponenttien testaamista, jotta voidaan varmistaa niiden sopivuus kytkentään. Seuraavaksi käydään läpi koekytkenän testausta, jossa kytkennän toimivuutta testataan osissa. Lopuksi voidaan aloittaa piirilevyn suunnittelu, kun koekytkenä on varmistettu toimivaksi.

### 8.1 Komponenttivalinnat

Komponentit valitaan niin, että ne soveltuvat mahdollisimman hyvin tätä tarkoitusta varten. Komponenttien datalehdiltä löytyy tarpeellinen tieto komponentin toiminnasta ja kuinka sitä sovelletaan. Tätä työtä ajatellen vaikein valittava komponentti on energiavarastokondensaattorin liipaisuun käytettävä mosfet, koska jännite-tasoon nähden riittävän nopeat mosfetit ovat harvinaisia.

Toiseksi haastavimpana komponentteina ovat pulssimuuntaja sekä suodatinkela, näiden osalta helpoimmalla pääsee, kun valmistaa ne itse. Tätä tarkoitusta varten löytyy paljon ferriittisydämiä, joihin voi itse käämiä tarvittavat induktanssit. Käämilanka kannattaa valita myös sen mukaan, että resistanssi ei pääse kasvamaan liian suureksi pituuden mukana. Pulssimuuntajan ensiö- ja toisiokäämit pitää käämiä mahdollisimman tiukoiksi, etteivät ne aiheuta häviöitä pulssiin.

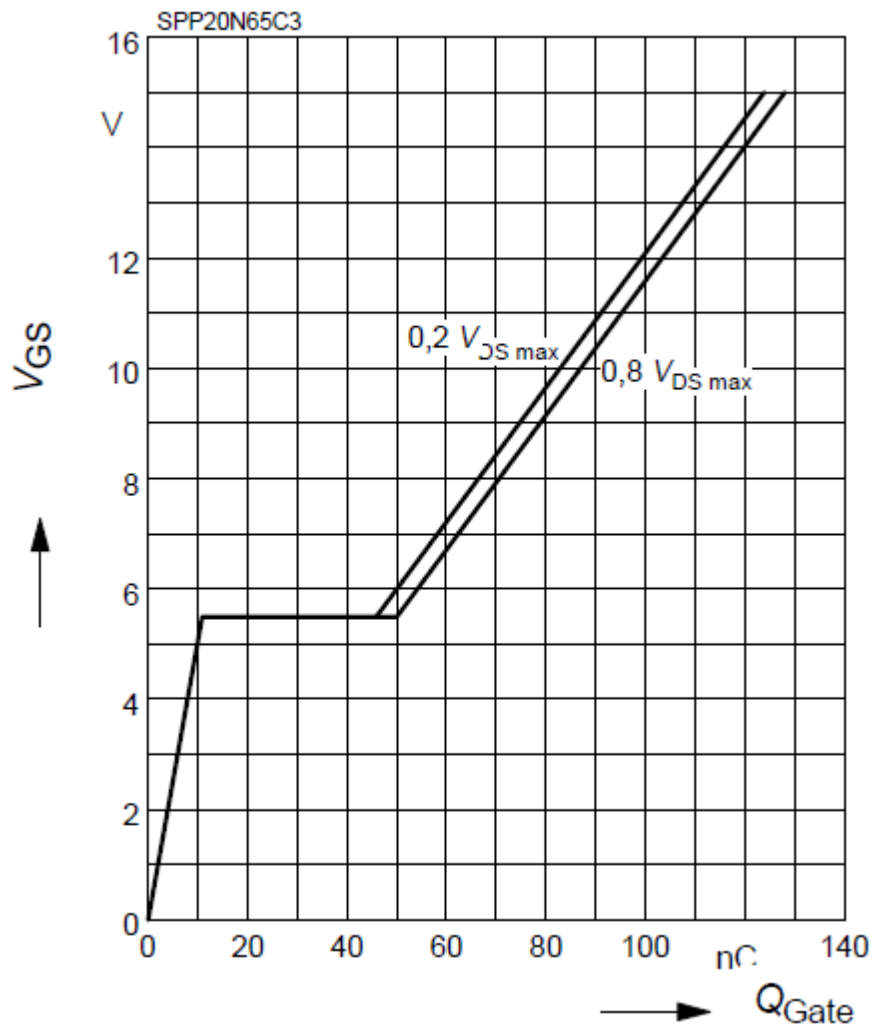
Suurjännitepuolella kondensaattoreiksi valitaan jännitteen kestolta riittäviä keraamisia kondensaattoreita, ettei kondensaattorissa tapahdu läpilyöntiä. Koekytkenässä käytetään jännitekestoltaan 3 kV:n kondensaattoreita. Keraamisissa kondensaattoreissa on se etu, että ne toimivat hyvin nopeissa muutoksissa, koska niiden sisäinen resistanssi on pieni.

Kokeilukytkenässä käytetään läpiladottavia komponentteja, koska niitä oli helppompaa käsitellä kuin pieniä pintaliitoskomponentteja.

### 8.1.1 Mosfet-transistori

Koekytkentää varten hankittiin Infineonin valmistama mosfet-transistori SPP\_A\_I20N65C3. Valmistaja lupaa tämän mosfetin jännitteen kestoksi nielun ja lähteen välille (DS) 650 voltia, mikä riittää tässä työssä. Virran kestoksi valmistaja lupaa 20,7 ampeeria nielun ja lähteen (DS) välille, sekä hetkellisen pulssivirran kestoksi 62,1 ampeeria. Nielun ja lähteen väliseksi resistanssiksi ilmoitetaan johtavassa tilassa 0,19 ohmia, tämä vaikuttaa energiavarastokondensaattorin purkausaikaan sekä tehohäviöön. Nousureunan nopeudeksi luvataan 5 ns, kun nielu-jännite  $V_{DD}$  on 380 voltia sekä nieluvirta  $I_D$  on 20,7 ampeeria. (Infineon 2009, 1 - 2.)

Haittapuolena tässä mosfetissa on suuri hilan kapasitanssi nC, jonka arvoksi on ilmoitettu tyypillisesti 87 nC ja maksimissa 114 nC. Tämä tarkoittaa sitä, että hilan ja nielun sekä hilan ja lähteen välillä on tietty määrä kapasitanssia, joka täytyy ladata ennen kuin mosfet voi avautua täysin johtavaksi. Kuviossa 48 on esitetty kuvaaja hilajännitteen noususta, kun hilakapasitanssi latautuu. Kuvaajassa esiintyy tasainen kohta, mikä ilmaisee kapasitanssin  $C_{GD}$  latausta ja aiheuttaa nousureunan nopeuden hidastumista. (Infineon 2009, 3.)



Kuvio 48. Hilakapasitanssin varaustarve  
(Infineon 2009, 7.)

### 8.1.2 Pulssimuuntaja

Muuntaja valmistetaan itse käämimällä kuparilankaa ferriittirenkaaseen yhden suhde yhteen periaatteella, eli yhtä monta kierrosta ensiö- ja toisiokäämiin. Muuntajan induktanssia ei kuitenkaan kannata kasvattaa liian suureksi, koska se vaikuttaa nousureunan aikaan. Koekytkenässä käytettiin ferriittirenkaana halkaisijaltaan 10 millimetrin rengasta, jonka  $A_L$  luku on 1760 nH per kierros. Tähän käämittiin noin 1,5 kierrosta ensiö- ja toisiokäämille. Lisäksi käytettiin pientä kierrosmäärää, jotta käämi voitiin kiristää riittävän kireälle, jolloin se aiheuttaisi mahdollisimman vähän häviöitä.

## 8.2 Komponenttien testaus

Komponenttien testauksessa testataan komponenttien sopivuus toteutettavaan kytkentään. Esimerkiksi liipaisuun käytettävän mosfetin nopeuden testaaminen on tärkeää, jotta voidaan valita oikeanlainen mosfet. Lisäksi komponenttien täytyy kestää kytkennän aiheuttama sähköinen rasitus. Käytettävien komponenttien ominaisuudet ja sille asetetut raja-arvot testataan niin, että voidaan todeta komponenttien sopivuus.

Pulssimuuntajaa ja suodatinkelaa varten ei ollut saatavilla induktanssimittaria, jolla olisi voitu varmistaa käämitysten induktanssit. Näiden toimintaa arvioitiin pulssimitauksissa, niin ettei niistä koidu liikaa häviöitä ja ne toimivat niin kuin simuloinnissa on mitattu. Simuloinnilla voitiin muuttaa mitattavan kelan tai pulssimuuntajan induktanssia helposti, jotta voitiin arvioida ovatko itse käämityt arvoltaan suurempia vai pienempiä kuin on laskettu  $A_L$ -luvun perusteella. Tämä ei silti ole täysin luotettava!

## 8.3 Kokeilukytkennän testaus

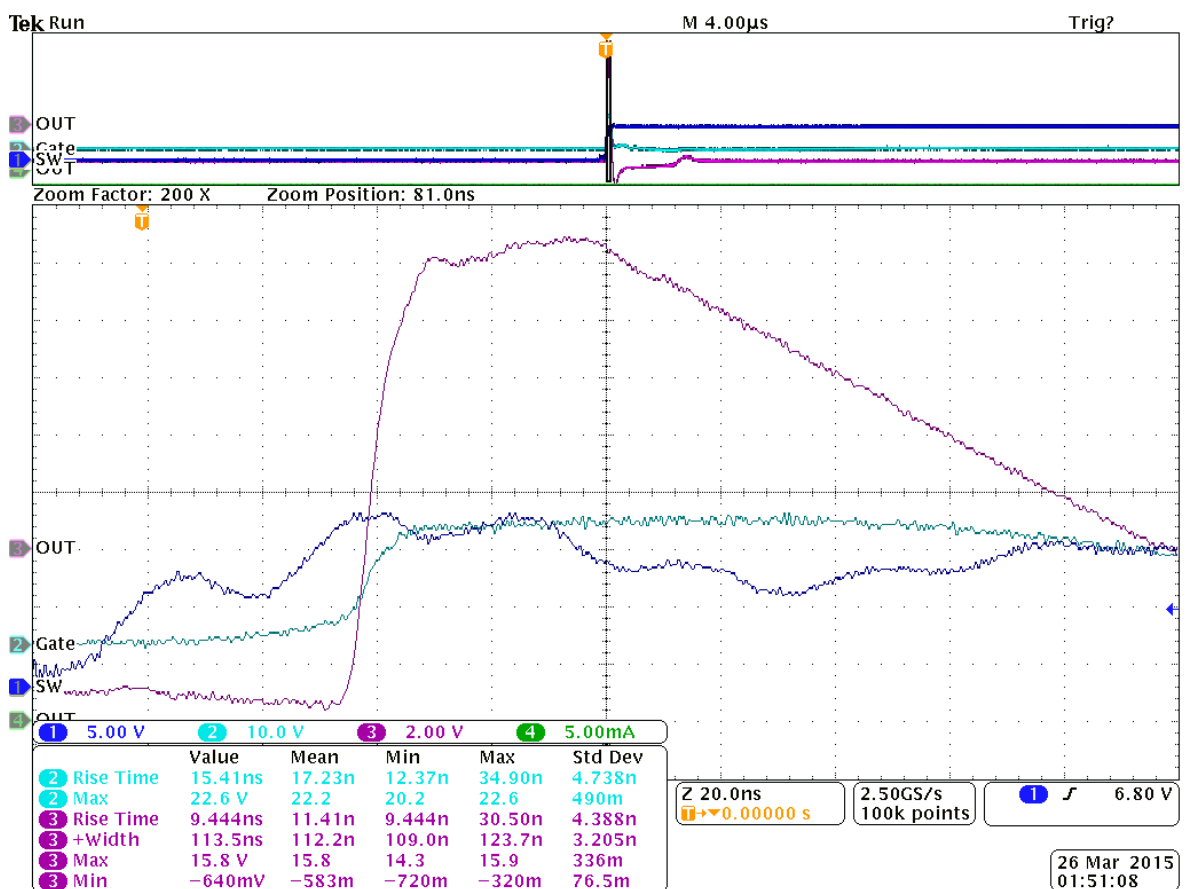
Koelaitetta varten kaiverrettiin käsijyrsimellä kuparilevylle piirikaavioon perustuva testilevy. Tämän jälkeen tarvittavat komponentit juotettiin paikoilleen. Kun osat oli juotettu, mitattiin kytkentä oikosulkujen varalta resistanssimittauksella. Lisäksi koekytkentä liitettiin säädettävään laboratorioteholähteeseen, jolla pystyttiin nostamaan kytkennän käyttöjännitettä sopivalla nopeudella. Näin pystyttiin havaitsemaan, kuinka paljon virtaa kytkentä ottaa.

### 8.3.1 Toiminnallisia mittauksia

Ensimmäisenä mitataan ohjaus-mosfetin ja pulssimuuntajan toiminta, jotta nähdään toimiiko kytkentä nopeimmalla taajuudella. Ohjaukseen liitetään signaaligeneraattori tai funktiogeneraattori, jolla voidaan ohjata mosfetiä 100 kHz:n taajuudella, 10 % pulssinleveydellä, joka on ajaksi muutettuna 1  $\mu$ s päällä ja jaksonaika 10  $\mu$ s. Käyttöjännite pidetään tässä vaiheessa alle 10 voltin, ettei rikota lii-

paisuun käytettävää mosfettiä. KytKentätaajuuden mittauksesta esitellään oskilloskooppikuva vasta myöhemmin.

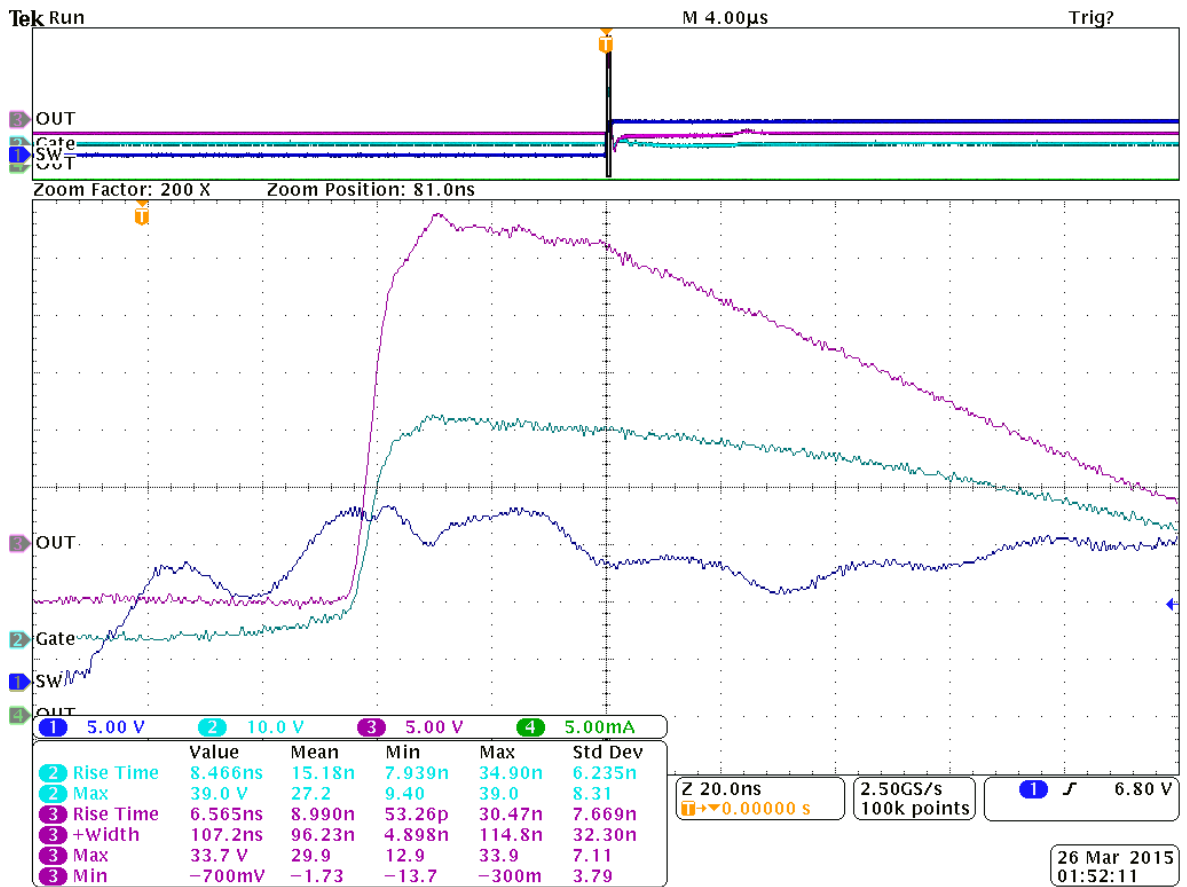
Yksittäisen pulssin testauksessa käytetään nappiohjausta, jotta saadaan pulssi aina halutessa. Tässä liipaistavaa jännitettä alettiin nostaa +20 voltista aina kahdenkymmenen voltin välein. Testilaitteistoon kuului kaksi kappaletta 60 voltin laborioteholähteitä. Nämä liitettiin sarjaan, jotta saatiin testausjännite nostettua 120 volttiin.



Kuvio 49. Pulssin nousureuna ja leveys 20 voltilla

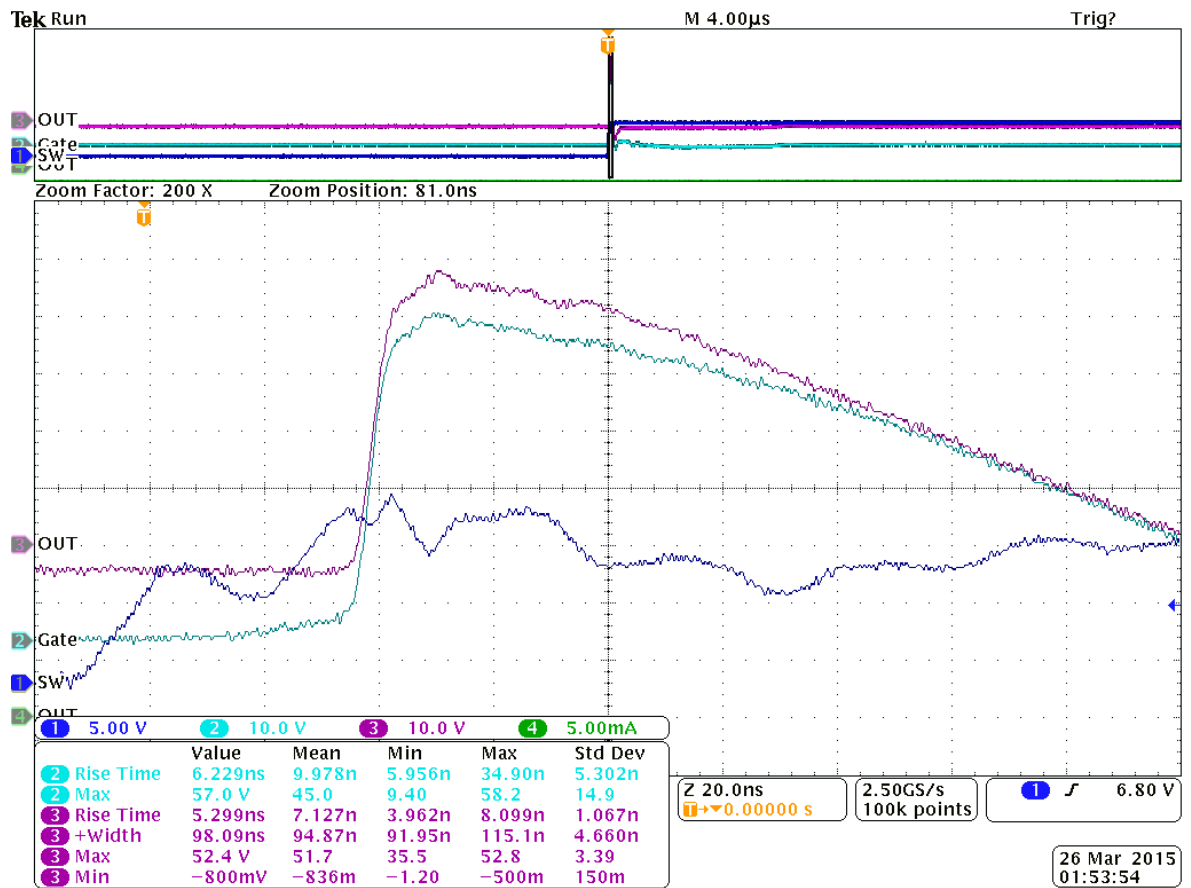
Oskilloskooppikuvasta (kuvio 49) voidaan havaita, että nousureuna on vielä liian hidas tuohon standardin mukaiseen nopeuteen nähden, sekä pulssinleveys on liian pitkä. SW-signaali (tummansininen) eli painonapin sulkeutuminen aiheuttaa jonkin verran värähtelyä. Tämä saattaa häiritä pahimmillaan ohjain-mosfetin toimintaa ja siihen olisi hyvä lisätä suodatusta. Gate-signaali (sinivihreä) on liipaisuun

käytettävän mosfetin jännite, tässä mittaus on asetettu 10 V/div, koska jännite on n. 7 voltia suurempi kuin ulostulojännite (purppura).

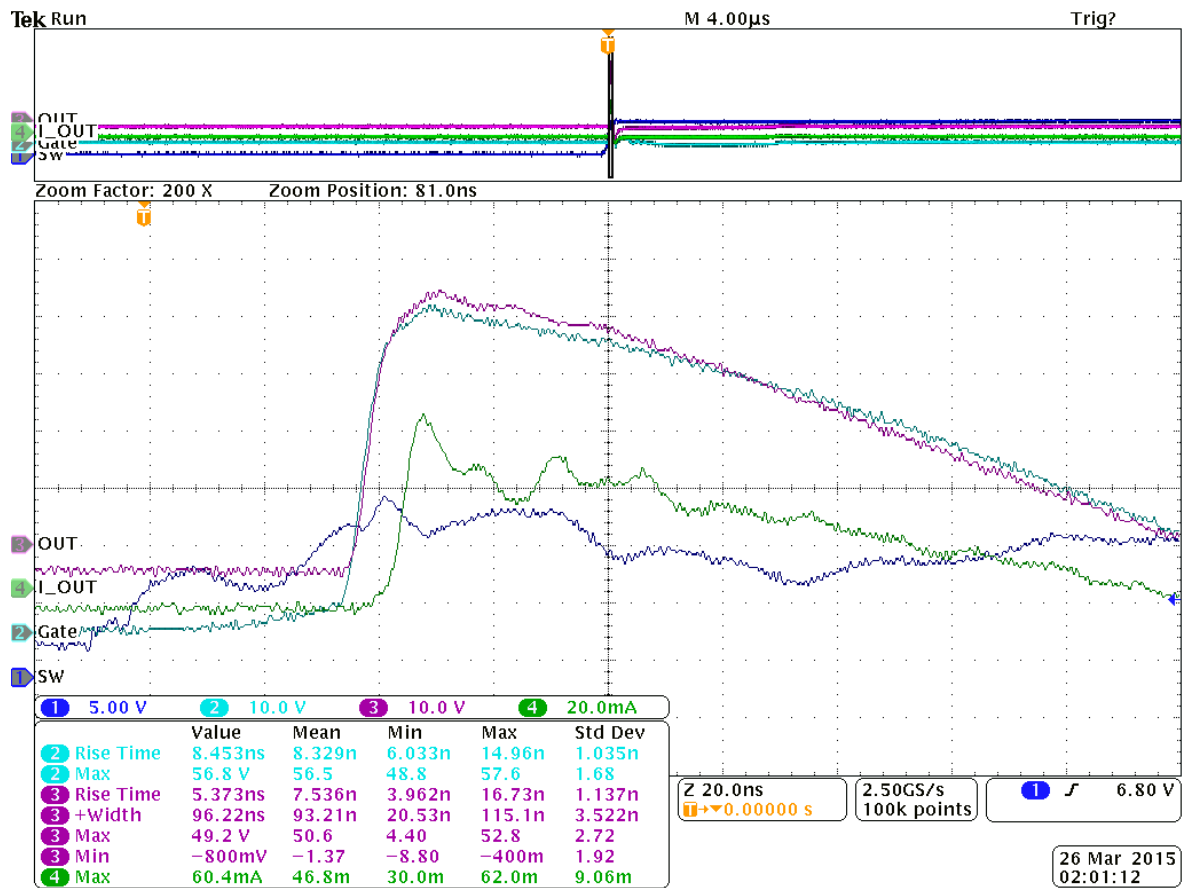


Kuvio 50. Pulssin nousureuna ja leveys 40 voltilla

Kuviosta 50 nähdään, kun liipaistava jännite on nostettu 40 volttiin, niin nousureuna on nopeutunut huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että pienemmillä jännitteillä ylä- ja alareunan muutokset ovat näkyvämpiä. Nousureunassa tapahtuu notkahdus ylhäällä, ja tämä saattaa vaikuttaa nousunopeuden mittaustulokseen.





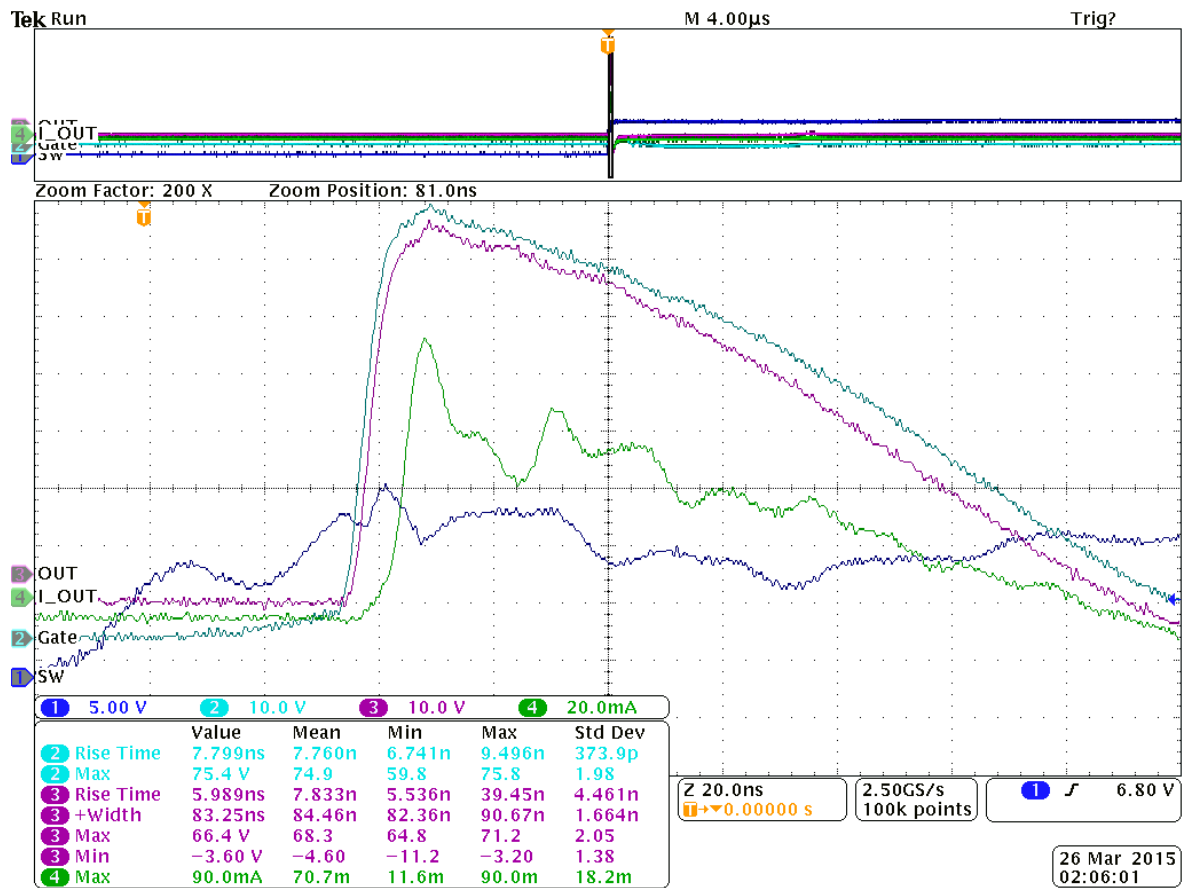


Kuvio 52. Virta 1 kΩ:n kuormalla

Seuraavaksi otettiin mukaan virtamittaus 1 kΩ:n kuormalla. Tässä ulostulojännite tippuu melkein 10 voltia, mutta virta on kuitenkin tuon liipaisujännitteen mukainen:

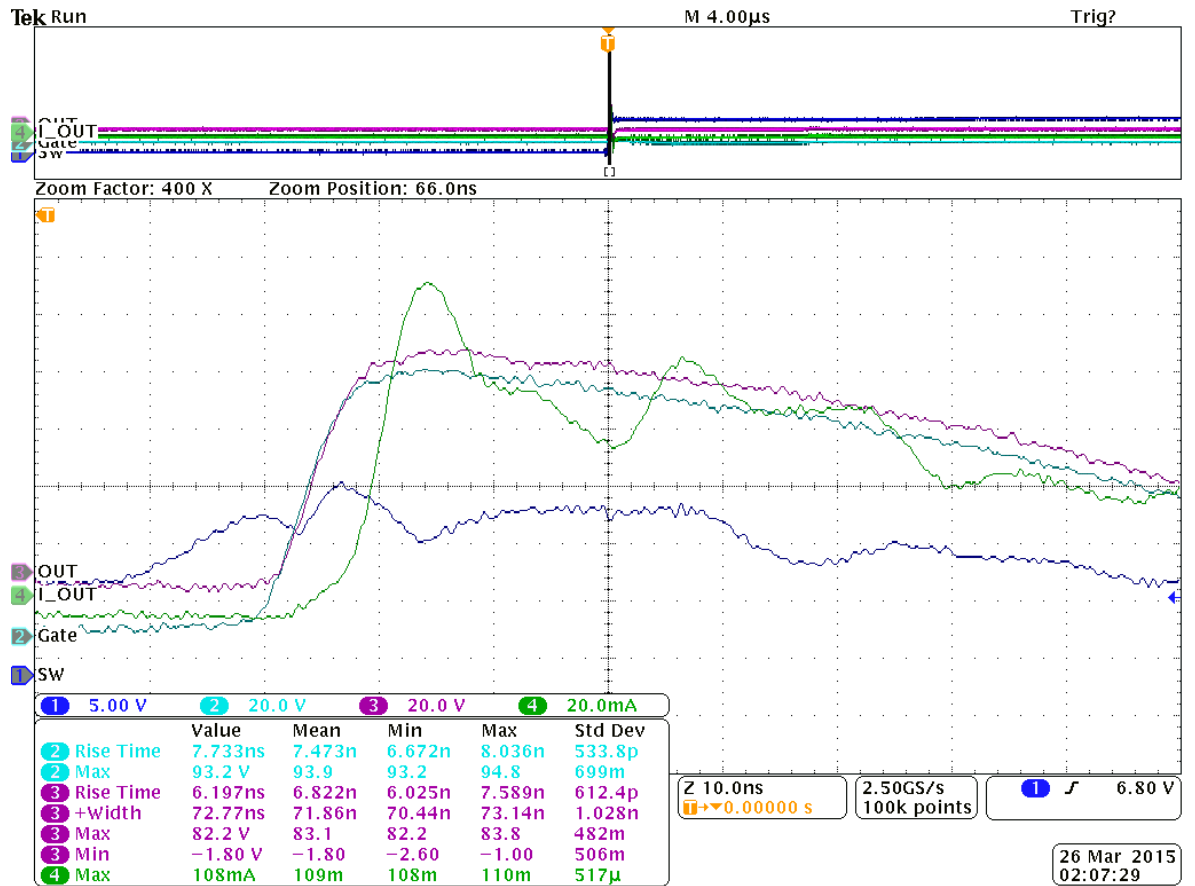
$$I_{OUT} = \frac{U}{R_L} \quad (16)$$

Lisäksi virran suuruuteen vaikuttaa 50 Ω:n vastus ulostulokytkennässä, mutta tämän vaikutusta ei vielä nähdä 1 kΩ:n kuormalla.



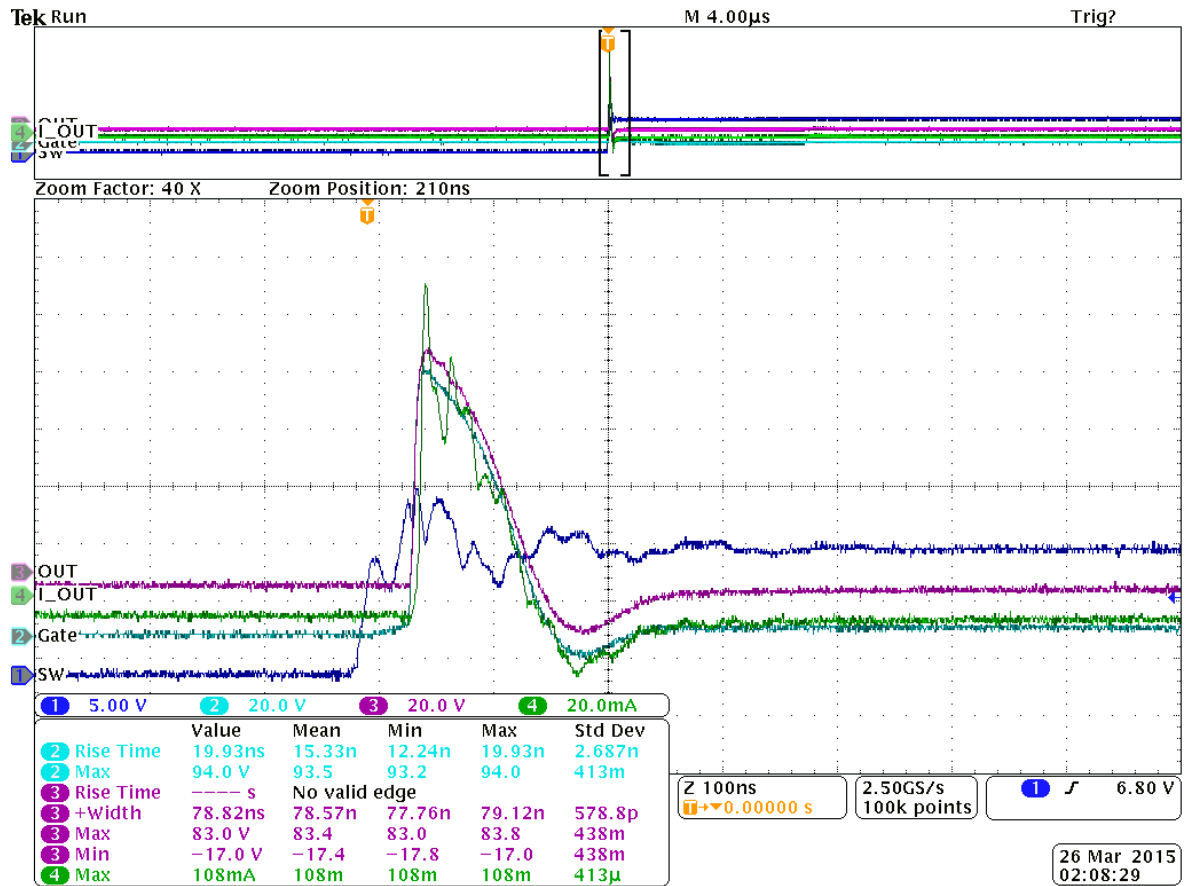
Kuvio 53. Pulssin nousureuna ja leveys 80 voltilla

Kuviossa 53 liipaisujännite on nostettu 80 volttiin ja virta mitattu 1 k $\Omega$ :n kuormalla. Kuvasta on havaittavissa OUT- ja Gate-signaalien nousun yläreunan kaareutumisen. Tämä alkaa vaikuttaa nousureunan nopeuden mittaustulokseen enemmän, kun liipaistavaa jännitettä nostetaan suuremmaksi. Ilmiö johtuu liipaisussa käytetävällä mosfetillä vaikuttavasta Miller-kapasitanssista, jonka takia myös ohjauksen jännitettä pulssimuuntajalle täytyisi kasvattaa, jotta saadaan liipaisupulssin energia kasvamaan.



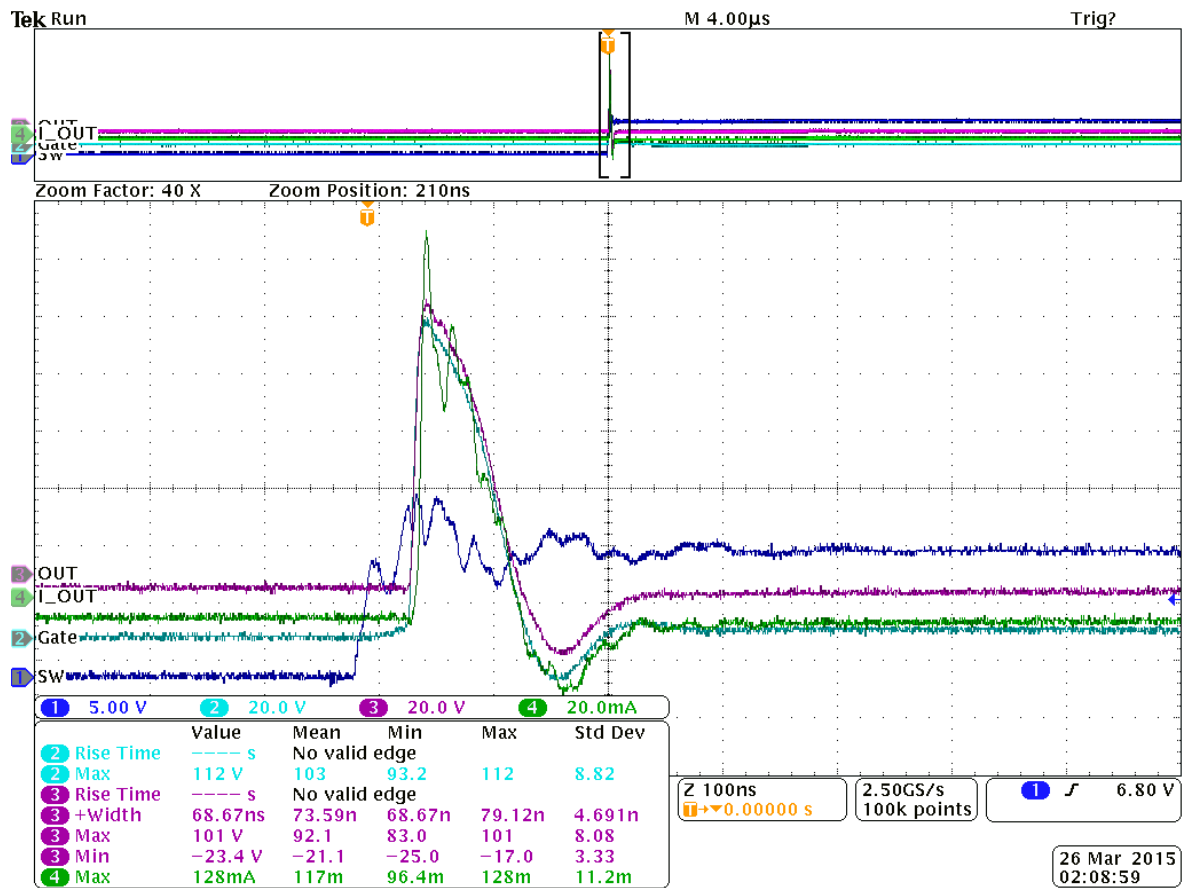
Kuvio 54. Pulssin nousureuna ja leveys 100 voltilla

Kuviosta 54 voidaan nähdä, että nousureuna on jonkin verran hidastunut, mutta pulssinleveys on kuitenkin lyhentynyt. Erityishuomio tehdään pulssin nousevan reunan yläosasta, jossa nähdään liiallista loivenemista, mikä vaikuttaa nousu aikaan.



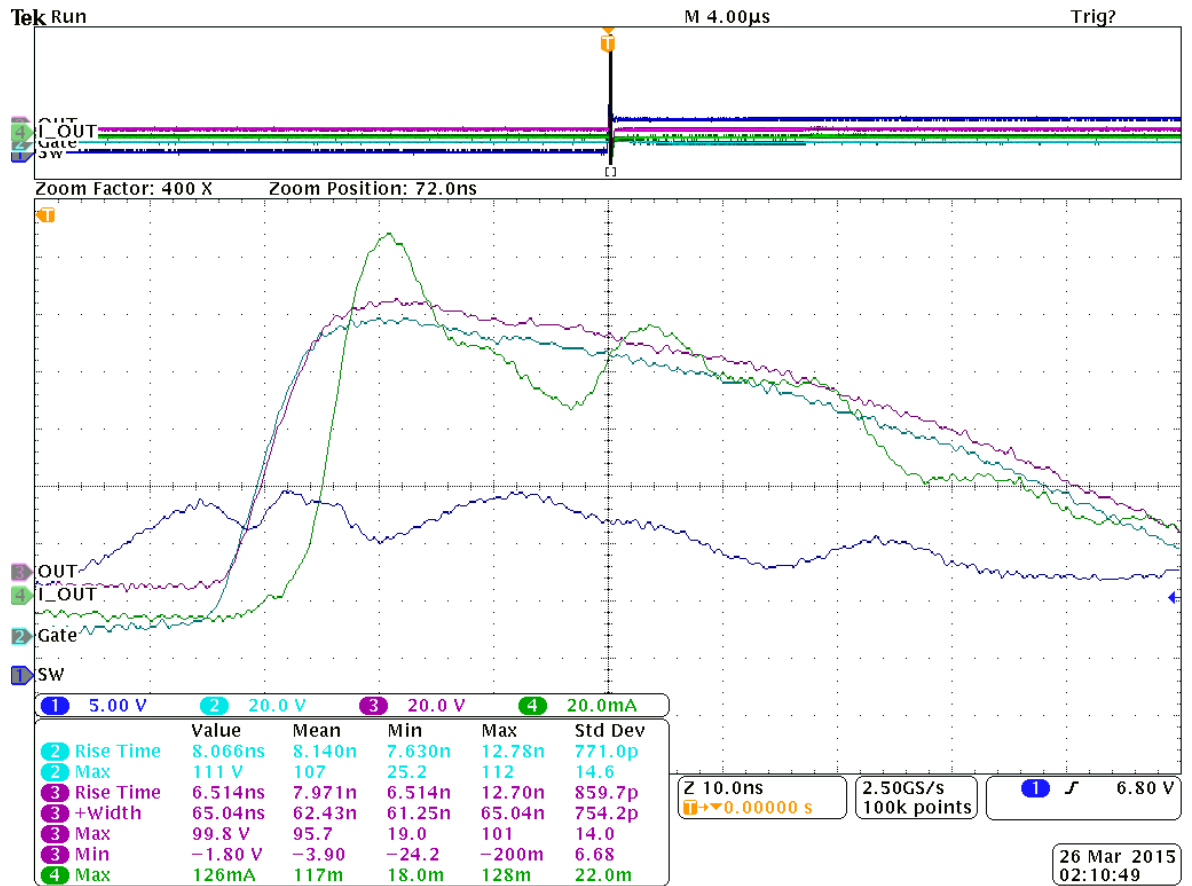
Kuvio 55. Kokonaiskuva mitattavasta pulssista 100 voltilla

Kuviosta 55 voidaan nähdä, kuinka pulssin laskevalla reunalla jännite käy reilusti negatiivisen jännitteen puolella. Tämä johtuu suodatinkytkenässä olevasta kelan energianpurkudiodista, joka on liian hidas tähän tarkoitukseen. Diodi vaihdettiin nopeaan signaalidiodiin, joka reagoi nopeasti jännitteen suunnanmuutokseen.



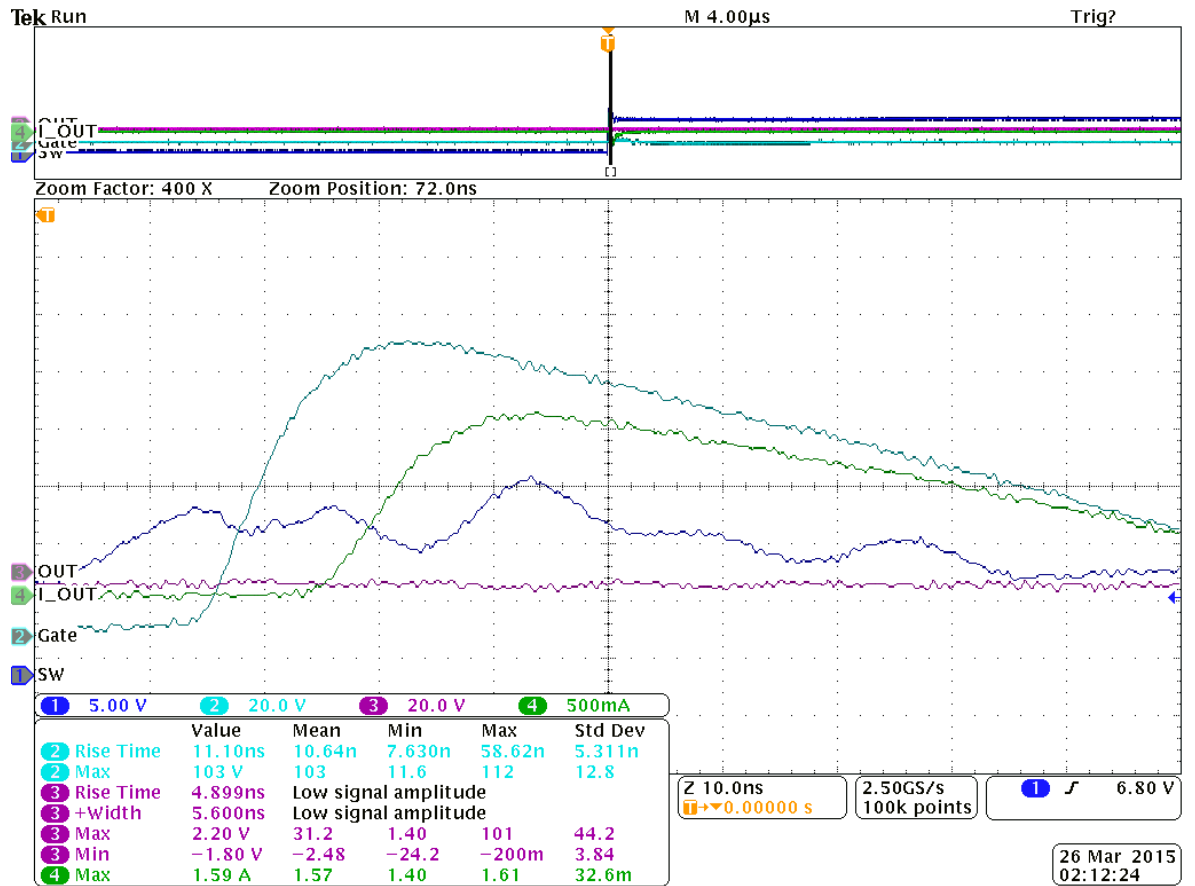
Kuvio 56. Kokonaiskuva mitattavasta pulssista 120 voltilla

Kuviosta 56 huomataan, että pulssinleveys on lyhentynyt hieman edellisestä mitauksesta. Lisäksi negatiivinen notkahdus laskevan reunan jännitteessä on kasvanut.



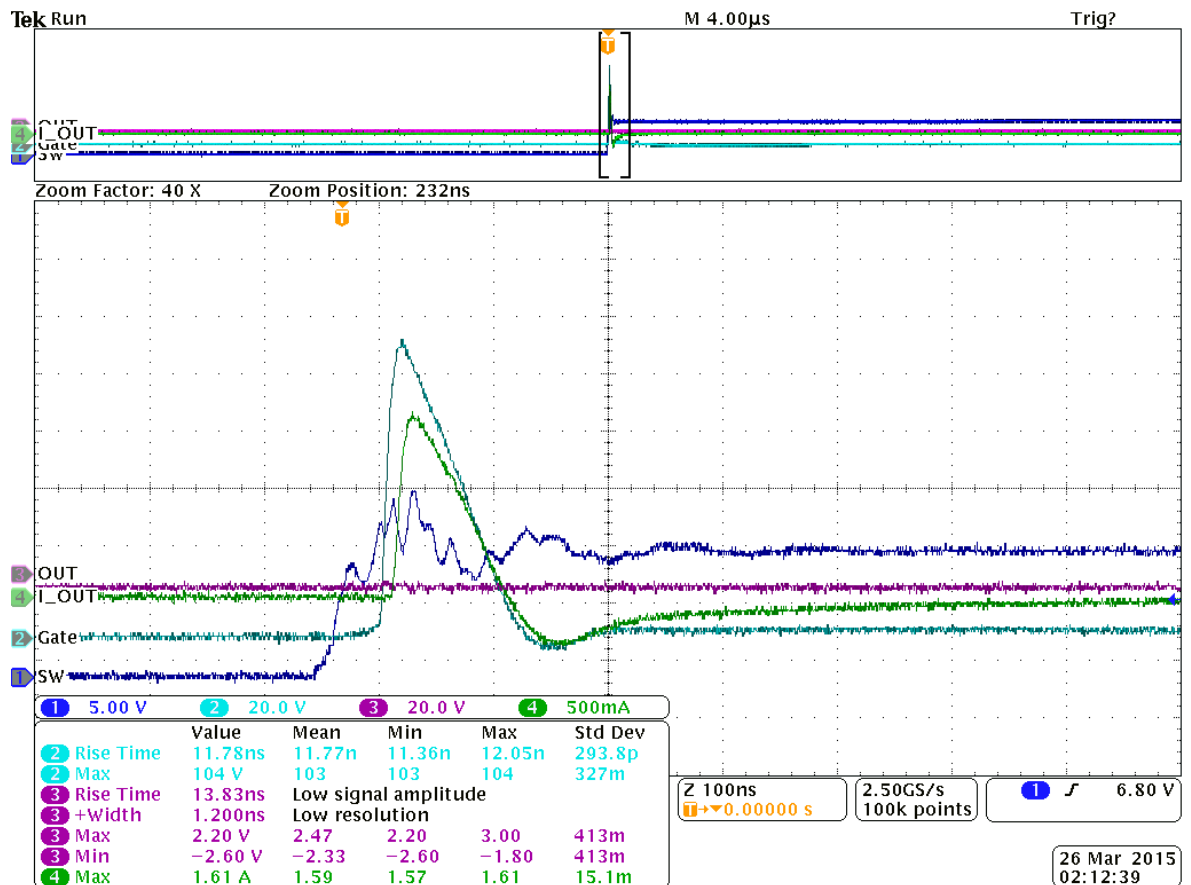
Kuvio 57. Pulssin nousureuna ja leveys 120 voltilla

Kuviosta 57 havaitaan, että nousureuna on hieman hidastunut, mutta pulssinleveys on lyhentynyt huomattavasti. Nousureunan hidastumiseen vaikuttaa liipaisussa käytettävän mosfetin hilan kasvanut energiantarve.



Kuvio 58. Oikosulkumittaus 120 voltilla

Kuviossa 58 on oikosulkumittaus, missä ulostulo on asetettu maahan, josta on seurannut oikosulku. Tässä on mitattu oikosulkuvirta, kuinka suureksi se voi kasvaa. Virtaa rajoittavana vastus 50  $\Omega$  pienentää virtapulssia tässä tapauksessa.



Kuvio 59. Kokonaiskuva oikosulkumittauksen virtapulssista

Kokonaiskuvassa on oikosulkumittauksesta otettu virtapulssi ja sen huippuvirta.

### 8.3.2 Parannuksia kytkentään

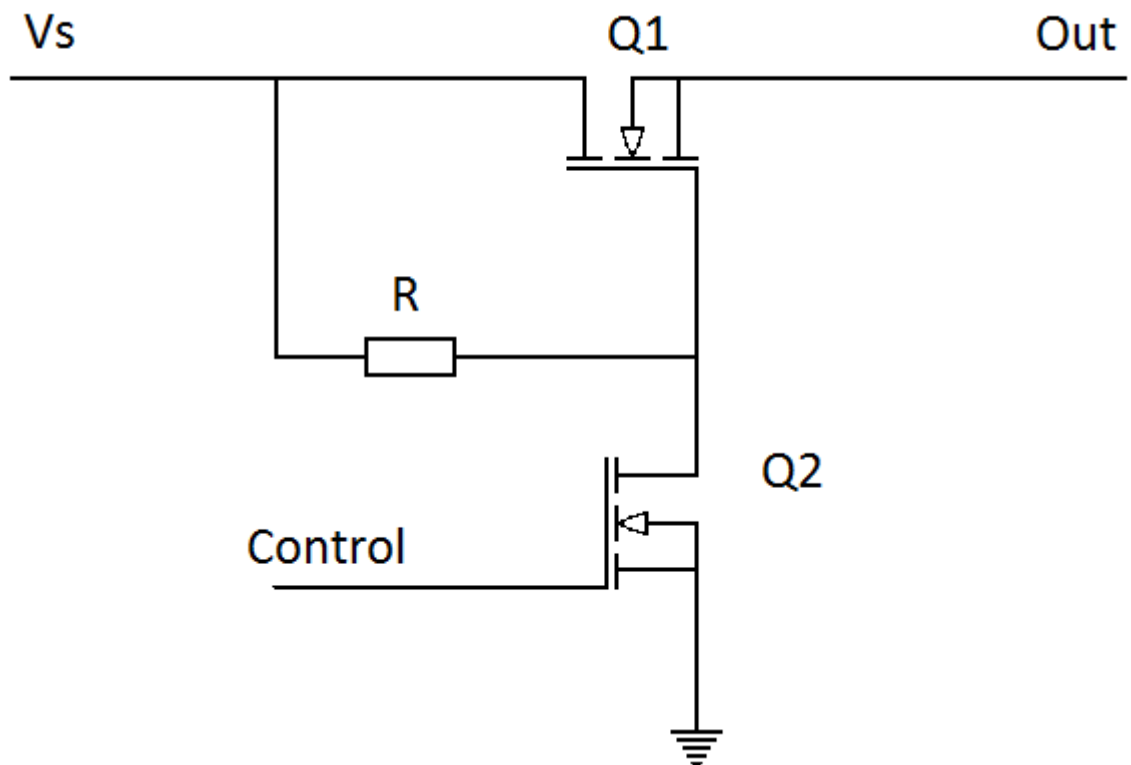
Koekytken testauksessa havaittiin muutamia epäkohtia, joiden korjaamiseksi ensin simuloitiin mahdollista parannusideaa. Tämän jälkeen, kun idea toimii simuloinnissa, sitä kokeillaan koekytkenässä.

Ensimmäisenä huomiona oli energiavarastokondensaattorin ja purkausvastuksen välinen toiminta. Koska ne olivat liian pieniä toisiinsa nähden, niitä jouduttiin kasvattamaan arvoiltaan suuremmiksi.



Tästä seurasi pulssinleveyden kasvaminen, minkä vuoksi täytyi suunnitella suodattinkytkeä jolla voitiin lyhentää pulssinleveyttä. Suodattimelle laskettiin teoria jonka jälkeen kytkentää simuloidaan, jotta voidaan tarkentaa komponenttiarvoja. Käytännön testeissä testataan suodattimen toimivuus tarkemmin.

Energiavarastokondensaattoreiden lataamista varten käytettävät vastukset voitaisiin korvata kytkennällä, joka katkaisee jännitesyötön aina liipaisun ajaksi. Tällä vältettäisiin vastusten lämpiäminen sekä niiden vaikutus kytkentätaajuuteen.



Kuvio 60. Latauksen ohjaus

Kytkenässä mosfet Q1 on niin kauan johtavassa tilassa, kunnes mosfet Q2 vetää Q1:n hilan maahan. Q2 menee johtavaan tilaan, kun pulssimuuntajan ohjainmosfetille tulee ohjaussignaali. Sama ohjaussignaali ohjaa tämän kytkennän mosfet Q2:sta.

## 8.4 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevyn suunnittelu aloitetaan vasta, kun koekytkentä todetaan toimivaksi. Tällä vältetään, ettei piirilevyä tarvitse piirtää useaan kertaan.

Piirilevyn piirtäminen aloitetaan piirtämällä KICAD-ohjelmalla kytkentäkuva, jonka jälkeen sen perusteella voidaan piirtää piirilevy. Ennen kuin piirilevy voidaan piirtää, valitaan komponenteille myös, minkälaisia koteloita käytetään. Toisin sanoen päätetään käytetäänkö läpiladottavia komponentteja, pintaliitoskomponentteja (SMD) vai mahdollisesti molempia.

Piirilevy suunnitellaan yksipuoliselle levyille, jolloin levy on helpompi valmistaa itse esimerkiksi syövyttämällä tai jyrsimällä. Yksipuolisessa piirilevyssä kannattaa huomioida mahdollisten hyppylankojen käyttö. Jos tällaisille tulee tarvetta, kannattaa niiden sijoitukset miettiä tarkkaan, ettei tule ylimääräisiä hajakapasitansseja tai hajainduktansseja. Nämä voivat aiheuttaa ongelmia pulssin muodostuksessa, vaimentaa pulssia tai aiheuttaa muita häiriöitä toimintaan.

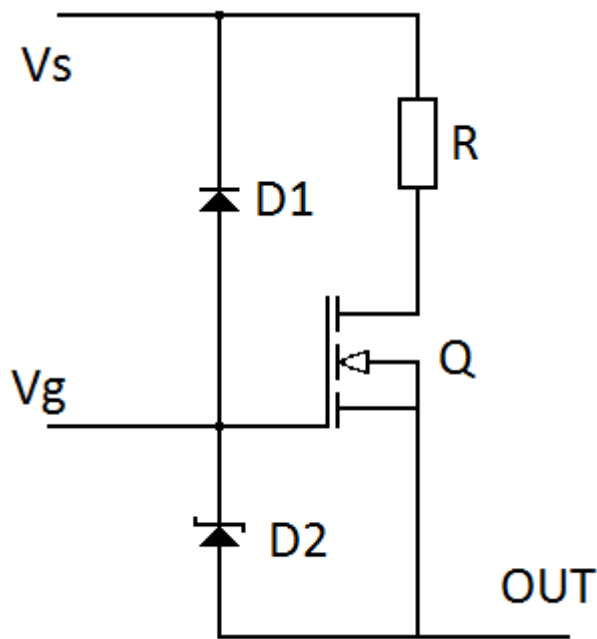
## 8.5 Kokonaisuuden testaus

Tässä työssä suunniteltu kytkentä testataan osakokonaisuutena, kun osat on juotettu piirilevyille. Tässä saadaan testattua myös, onko piirilevy toimiva ja onko johdot toteutettu oikein, ettei tästä tule toimintaan häiriöitä.

Lisäksi kokonaisuuden testaamisessa olisi tarpeen testata toteutettavan teholähteen sekä negatiivisen transientin tuottavan kytkennän välinen toiminta. Kokonaistestausta ei pystytä toteuttamaan tässä mittakaavassa, ennen kuin kaikki tarvittavat osat on suunniteltu ja toteutettu.

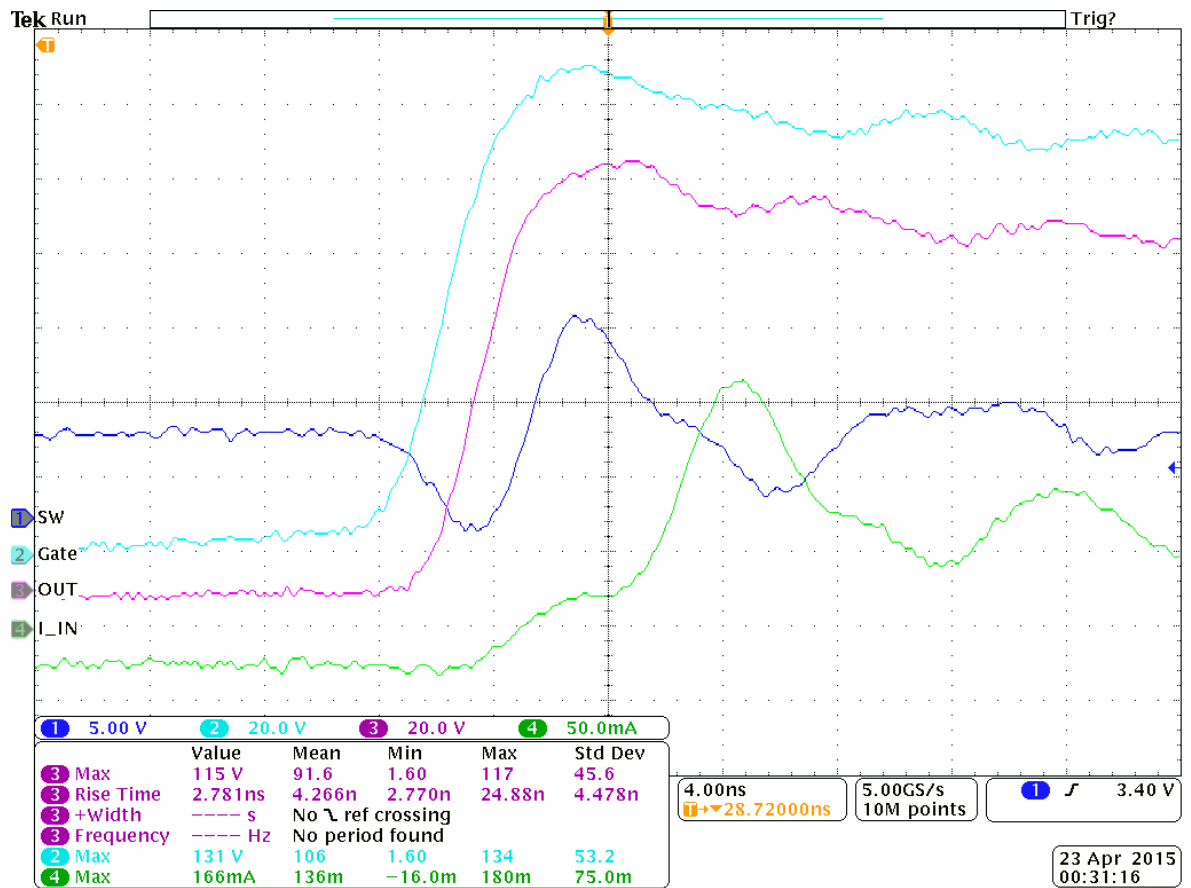
## 9 Koekytännän tuloksia

Koekytkentään muutettiin pulssimuuntajan käyttöjännitteen syöttö samasta jännitelähteestä kuin energiavarastokondensaattorin jännitesyöttö. Tämä muutos vaikuttaa liipaisuun käytettävän mosfetin hilajännitteeseen niin, että se on sama kuin nielujännite. Muutos vaikuttaa suoraan mosfetin aukeamiseen, eli kuinka nopeasti mosfet alkaa johtaa. Tämä kuitenkin lisää riskiä, että hilan ja lähteen välinen jännite kasvaa liian suureksi. Kytkentään voidaan lisätä kaksi eri suojadiodia eli hilan ja lähteen väliin zenerdiodi, jonka kynnyksjännite vastaa hilan ja lähteen välistä maksimijännite-eroa. Toinen suojadiodi kytketään hilan ja syöttöjännitteen välille, eli jos hilajännite nousee suuremmaksi kuin syöttöjännite, niin diodi alkaa johtaa ylimenevän jännitteen jännitesyöttöä kohti.



Kuvio 61. Mosfetin suojadiodit

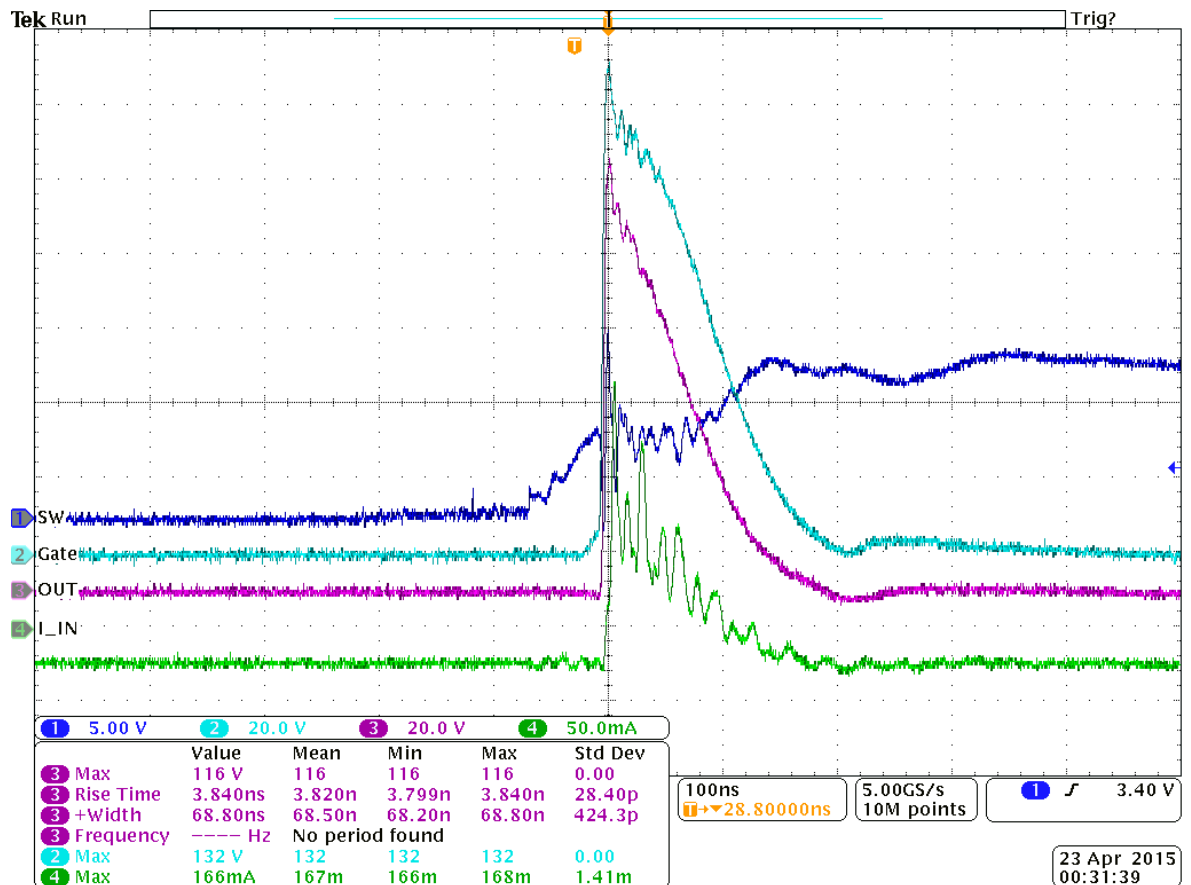
Testaustuloksien perusteella tällä muutoksella saadaan tehokkaasti kompensoitua mosfetin Miller-kapasitanssia. Mittaustuloksista havaitaan huomattava parannus jännitteen nousu-aikaan sekä pienempi toleranssi nousuajan vaihtelussa, mikä oli mittausten perusteella n. 0.5 ns.



Kuvio 62. Nousureunan nopeus 120 voltilla

Mittauksessa käytettiin kuormana 1 k $\Omega$ :n vastusta, jotta nähtäisiin onko kuormalla vaikutusta jännitepiikin huippuarvoon. Kuviossa 62 vaaleansininen signaali on liipaisuun käytettävän mosfetin hilajännite ja purppurasignaali on ulostulojännite. Vihreä signaali on ulostulovirta, jota rajoittaa 56  $\Omega$ :n sarjavastus.

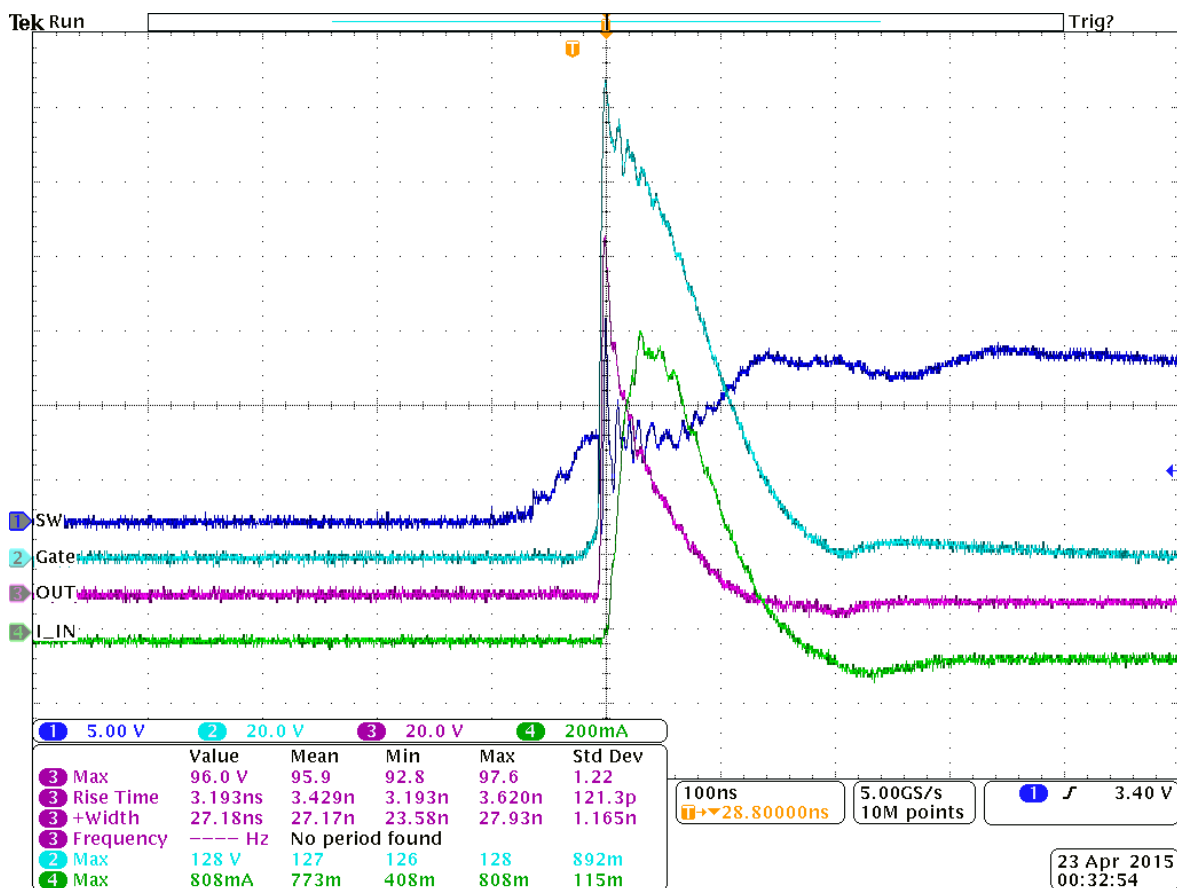
Mittauksesta huomataan, että nousureunan nopeus on nopeampi kuin standardissa on määritelty, mutta tässä liipaisuun käytetyllä mosfetillä hilavastus on vielä pieni. Hilavastusta kasvattamalla voidaan nousuaikaa pidentää sopivammaksi.



Kuvio 63. Pulssinleveys 120 voltilla ja 1 kΩ:n kuormalla

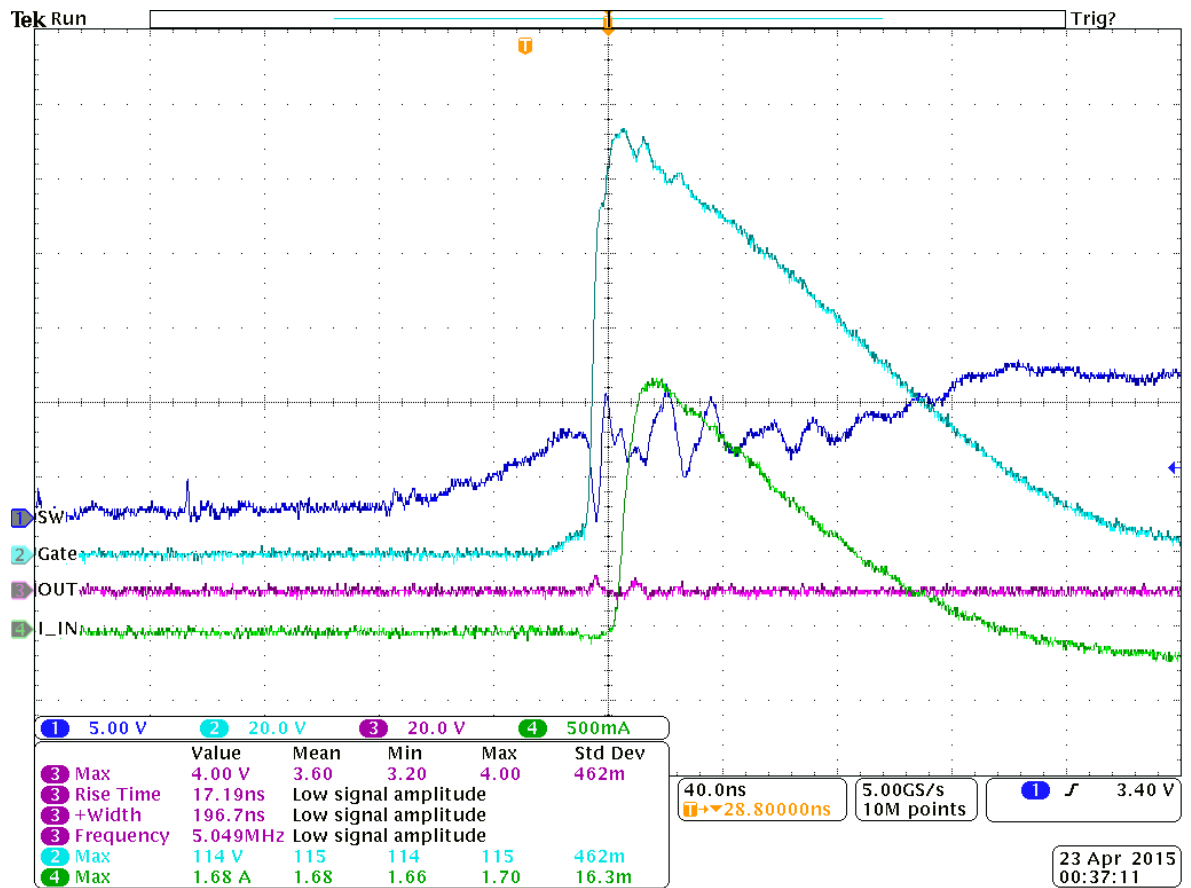
Pulssikuvasta huomataan, että ulostulevan signaalin (purppura) laskevalla reunalla ei ole jännitteessä notkahdusta negatiiviselle puolelle. Tämä muutos johtuu suodatinkytken kelan energianpurkudiodin vaihtamisesta nopeaan signaalidiodiin BYV26E. Diodi reagoi nopeammin jännitteen muutokseen kuin aiemmin käytetty 1N4007-diodi.

Tuloksesta nähdään, että signaali on standardin määrittelemien rajojen sisällä, mutta testauksessa huomattiin, että pulssinleveys lyheni vasta suuremmilla jännitteillä. Pulssinleveys asettui alle 100 ns vasta 60 V jälkeen, eli 80 V mitattiin noin 80 ns pulssinleveyksiä.



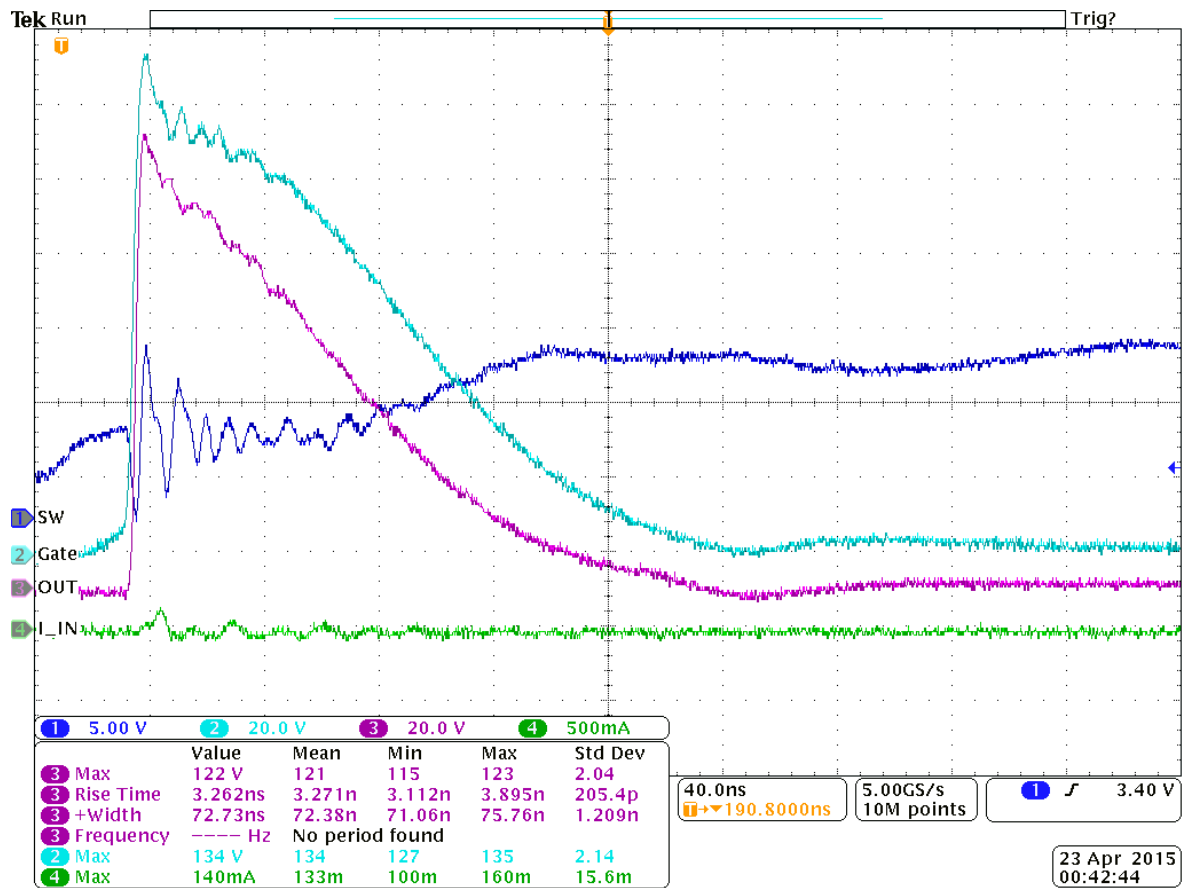
Kuvio 64. Pulssinleveys 120 voltilla ja 47  $\Omega$ :n kuormalla

Mittauksesta huomataan, että pulssinleveys on lyhentynyt huomattavasti (purppurasignaali), eli n. 27 ns. Virta vastaa tuota ulostulevan jännitteen sekä sarja- ja kuormavastuksen suhdetta.



Kuvio 65. Pulssin oikosulkuvirta 120 voltilla

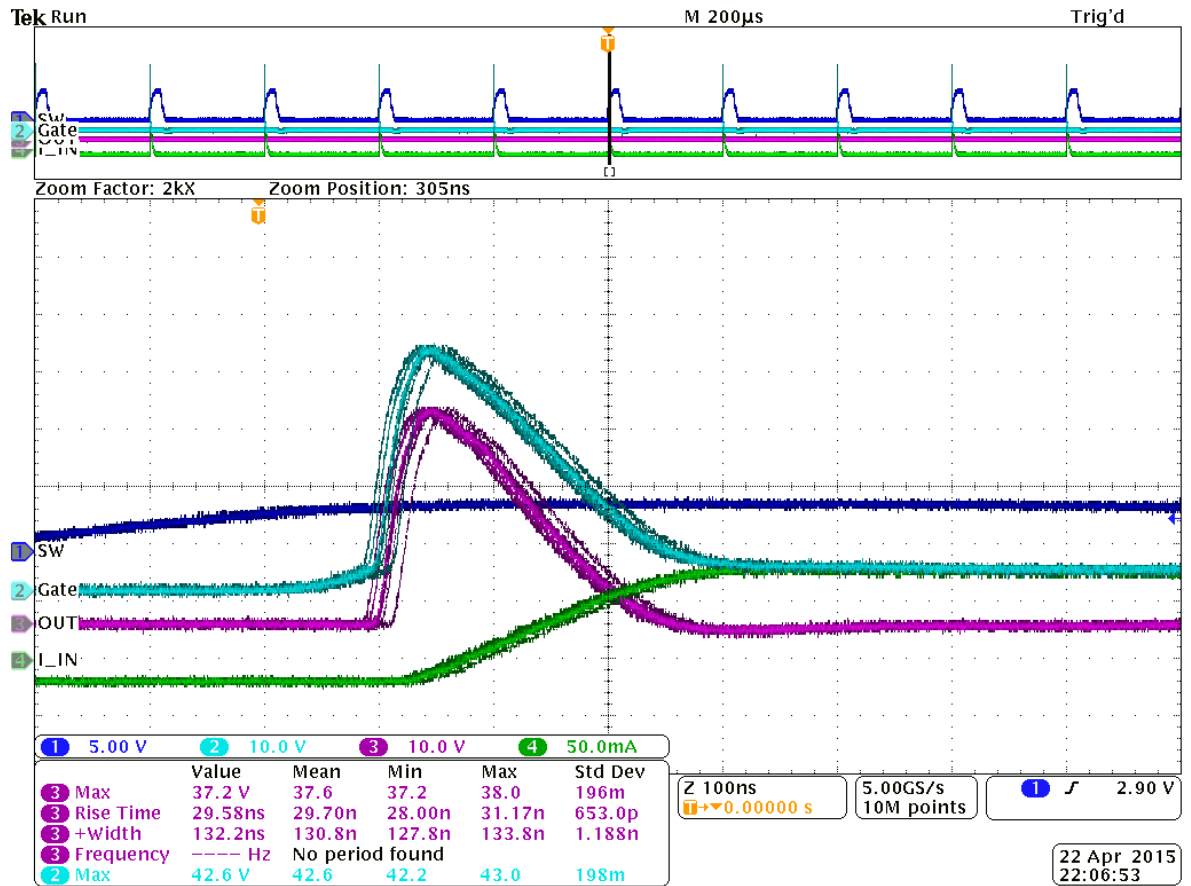
Oikosulkuvirran mittauksessa virtaa rajoittaa ulostulokytkennän sarjavastus, eli  $56 \Omega$ . Tämän perusteella voidaan päätellä, että huippuvirta on oikea, jos lasketaan virran ja vastuksen tulo, niin jännite on lähes tuo sama kuin liipaisuun käytetyn mosfetin lähdejännite (ei mittausta tässä kuvassa).



Kuvio 66. Pulssimittaus 120 voltilla ilman kuormaa

Mittauksessa ilman kuormaa tulee voimakkaasti esille kytkimeltä mitatun jännitteen (tummansininen) värähtely. Tämä ilmiö näkyy kuormamittauksissa lievempänä, mutta ilman kuormaa värähtely voimistuu. Ohjauspuolen kytkentään olisi hyvä tehdä lisää suodatusta, eli muutakin kuin tuo kytkimen RC-suodatin, tai tarkastaa sen mitoitus, onko se oikea.





Kuvio 67. Kytkennän ohjaus signaaligeneraattorilla 5 kHz

Kytkenän ohjauksessa signaaligeneraattorilla huomataan, että jännitteet vaime-  
nevat huomattavasti. Teholähteellä jännite 60 V ja signaaligeneraattorin ohjaus on  
kytkettynä pulssimuuntajaa ohjaavan mosfetin hilalle. Testauksen perusteella  
näyttäisi siltä, että signaaligeneraattorin teho ei riitä ohjaukseen. Tämä saadaan  
korjattua esimerkiksi gate driver -piirillä eli puskuripiirillä, joka vahvistaisi ohjaus-  
signaalin riittäväksi mosfetin ohjaamiseksi. Nopeammalla ohjauksella, eli 100  
kHz:n ohjauksella tilanne on sama.

Liitteestä 1 löytyy kytkentäkaavio, joka vastaa näiden testaustuloksien kytkentää.  
Lisäksi liitteessä on lista komponenteista ja kommentointia muuttuneista kom-  
ponenteista sekä onko kyseisen komponentin kohdalla testauksessa puutetta.

## 10 POHDINTAA JA YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, miten transienttigeneraattori voitaisiin toteuttaa. Transienttigeneraattorilla tehtäisiin tuotekehityksessä tulo- ja lähtöporttien transienttikestävyyden testausta uusille, ja tarvittaessa vanhoillekin, tuotteille. Työssä keskityttiin pelkästään positiivisen transienttipiikin ja purskeen tuottamiseen.

Työssä onnistuttiin suunnittelemaan kytkentä, jolla voitiin tuottaa yksittäinen transienttipulssi, joka vastasi standardin määrittelemää pulssimuotoa. Kytkentää yritettiin suunnitella sen mukaisesti, että voitaisiin signaaligeneraattorin avulla tuottaa standardissa määritellyjä purskeita. Testeissä kävi kuitenkin ilmi, että nopeampi ohjaus aiheuttaa pulsseihin jännitteen vaimenemista. Tämä tarvitsee lisätutkimusta, jotta voitaisiin tuottaa tarvittavat purskeet.

Transienttigeneraattorille ei myöskään suunniteltu vielä piirilevyä, koska siihen olisi tarkoitus myös suunnitella negatiivisen pulssin tuottava kytkentä. Negatiivisen transienttipiikin tuottavaa kytkentää on pohdittu vasta ajatustasolla. Tämä kytkentä olisi kuitenkin tarkoitus suunnitella myöhemmin, että voitaisiin toteuttaa toimiva laite.

Teholähde voidaan suunnitella kokonaan erillisenä työnä, koska tässä työssä suunniteltu transienttigeneraattori toimii myös muillakin tasajännitetehtolähteillä. Tästä johtuen transienttigeneraattori voidaan toteuttaa niin, että sen käyttämiseen voidaan käyttää jo olemassa olevia teholähteitä.

Työstä saatiin hyvä pohja transienttigeneraattorin jatkokehitykselle, jossa on tarkoitus kehittää täysin toimiva transienttigeneraattori, niin kuin se on tässä työssä määritelty. Tähän mennessä suunniteltu transienttigeneraattori soveltuu kuitenkin jo käytettäväksi yksittäisten pulssien testaukseen.

Työn aikana toteutetusta koekytkennästä ei ehditty täysin testaamaan kaikkia kytkennän toimintoja, kuten määritellyä maksimijännitettä (500 V) ja liipaisuun käytetyn mosfetin tarvitsemia suojausja sekä niiden kestävyttä käytössä. Kytkennän toimivuuden testaus ja toimivuuden parantelu jatkuu vielä tämän työn jälkeen.

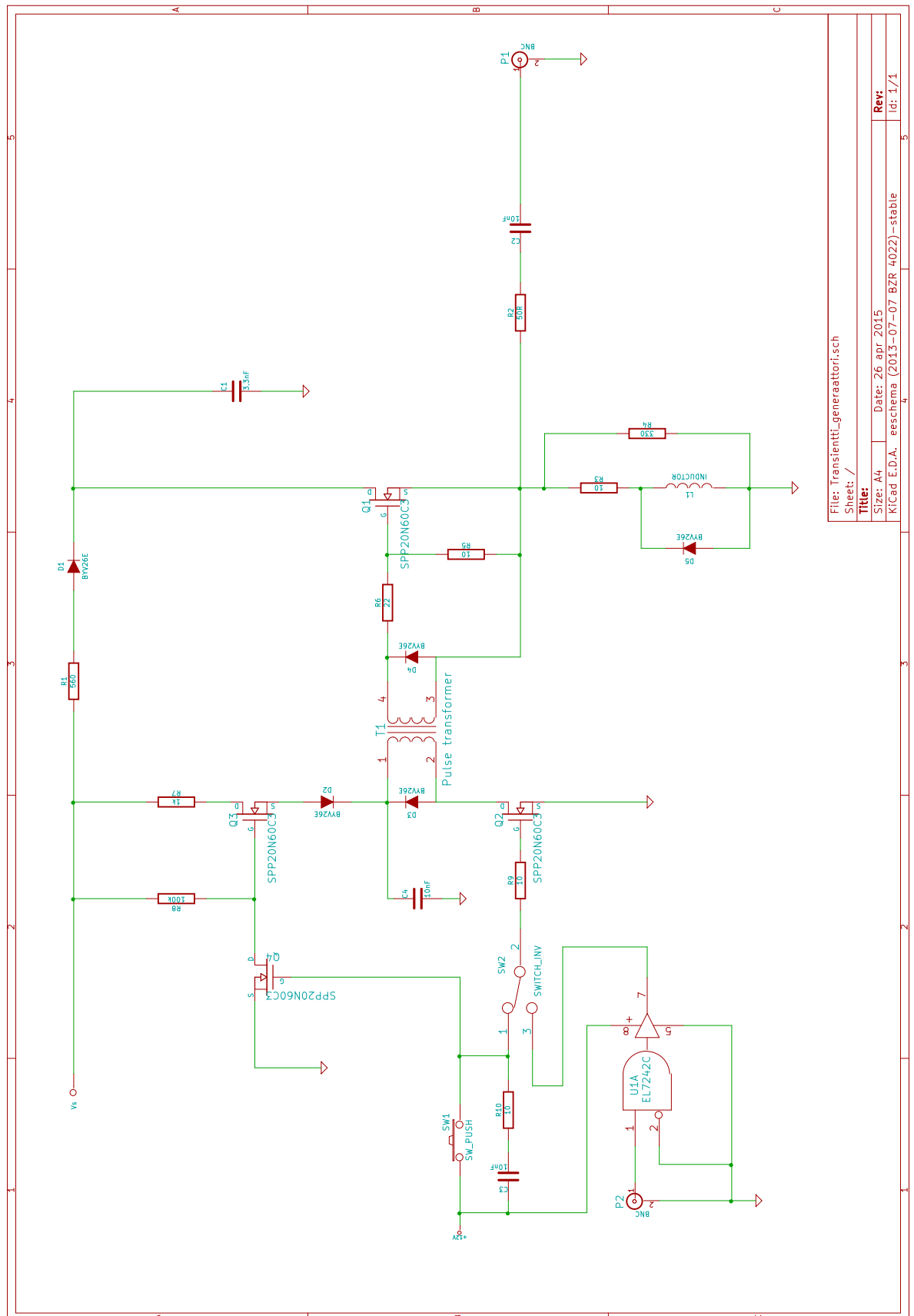
## LÄHTEET

- Behlke. 2001. Fast high voltage transistor switches. [Verkkolähde]. Behlke Electronic GmbH. [Viitattu 22.4.2015]. Saatavissa: <http://www.behlke.com/pdf/30-08-uf.pdf>.
- Brown, J. 2004. Power MOSFET Basics: Understanding Gate Charge and Using it to Assess Switching Performance. [Verkkolähde]. Vishay Intertechnology Inc. [Viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: <http://www.vishay.com/docs/73217/73217.pdf>.
- Butler. Ei päiväystä. Pulse Transformer – Operating Principles. [Verkkolähde]. Butler Winding. [Viitattu 27.4.2015]. Saatavissa: <http://www.butlerwinding.com/pulse-transformer-operating-principles/>.
- Dudenhoeffer, E. 2012. New requirements of IEC 61000-4-4 Edition 3 – 2012, Trends for next revision of IEC 61000-4-5. [Verkkolähde]. Teseq AG. [Viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: [http://www.tech-dream.com/Seminar/EMC\\_Test\\_Seminar/Randy\\_05-08-12.pdf](http://www.tech-dream.com/Seminar/EMC_Test_Seminar/Randy_05-08-12.pdf).
- EN 61000-4-4. 2012. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test (IEC 61000-4-4:2012). Brussel: European Committee for Electrotechnical Standardization.
- Epec. 2013. Epec Oy – Control system solutions for extreme conditions (company video, English version). [Video]. Epec Oy. [Viitattu 13.4.2015]. Saatavana: [https://www.youtube.com/watch?v=yZD3b3tZ\\_D8](https://www.youtube.com/watch?v=yZD3b3tZ_D8).
- Hautala, M. & Peltonen, H. 2009. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa 1. 9. painos. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Honkanen, H. 2013a. Kapasitiivinen ja induktiivinen kytkeytyminen. [Verkkolähde]. Kajaanin ammattikorkeakoulu. [Viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs\\_Kapasitiivinen\\_ja%20Induktiivinen.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs_Kapasitiivinen_ja%20Induktiivinen.pdf).
- Honkanen, H. 2013b. EMC –vaatimukset, käsitteitä ja asiaa EMC –mittauksista. [Verkkolähde]. Kajaanin ammattikorkeakoulu. [Viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs\\_vaatimukset\\_1.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs_vaatimukset_1.pdf).
- Infineon. 2009. SPP20N65C3, SPA20N65C3, SPI20N65C3 Cool MOS<sup>TM</sup> Power Transistor. [Verkkojulkaisu]. Infineon Technologies AG. [Viitattu 14.4.2015]. Saatavissa: [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPP\\_A\\_I20N65C3-DS-v03\\_01-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42ea4314a07](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPP_A_I20N65C3-DS-v03_01-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42ea4314a07).

- Lepkowski, J. 2005. An Introduction to Transient Voltage Suppression Devices. [Verkkolähde]. ON Semiconductor. [Viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/AND8229-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8229-D.PDF).
- Peltonen, H. Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2007. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa 2. 7. Painos. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Picard, J. 2006. Electrical Transient Immunity for Power-Over-Ethernet. [Verkkolähde]. Texas Instruments Inc. [Viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/an/slva233a/slva233a.pdf>.
- Pohjolainen, S. 1999. Nykyelektroniikan suursanakirja, englanti-suomi. 1. painos. Helsinki: Helsinki Media Erikoislehdet.
- Silvonen, K. 2009a. Sähkötekniikka ja piiriteoria, Passiiviset komponentit, sähköfysiikka, DC-, AC- ja transienttianalyysi, osoitinlaskenta, sähkövoimatekniikka, kaksiporit, RF-tekniikka. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press Oy Yliopistokustannus.
- Silvonen, K. 2009b. Elektroniikka ja puolijohdekomponentit, Analogia- ja digitaali-tekniikka, vahvistimet, tehollähteet, suodattimet, teho- ja tietoliikenne-elektroniikka, piirisimulointi. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press Oy Yliopistokustannus.
- Uusitalo, J-P. 2009. SMG-5250 Sähkömagneettinen yhteen sopivuus, EMC. [Verkkojulkaisu]. Tampereen teknillinen yliopisto. [Viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-5250/Muuta/emc.pdf>.
- Varviala, J. 2009. Hakkuritehollähteet ja niiden ominaisuudet. [Verkkojulkaisu]. Lahden ammattikorkeakoulu. [Viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2770/Varviala\\_Jaakko.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2770/Varviala_Jaakko.pdf).

## LIITTEET

## LIITE 1 Kytkäntäkaavio



Kytkentäkaavion osat eivät ole lopullisia, vaan tällä hetkellä testattuja. Kuitenkaan kaikkia kytkennän suunnitelmia ei ole vielä testattu käytännössä, vaan osan testaaminen jää myöhemmäksi. Näistä esimerkkeinä ohjauksen jännitteen katkoja, eli mosfetit Q3 ja Q4, näiden toiminta täytyy vielä varmistaa käytännön testein.

Kytkenässä käytetyt komponentit:

Q1 – Q4	SPP20N60C3
D1 – D5	BYV26E
R1	560 $\Omega$
R2	50 $\Omega$
R3, R4, R9, R10	10 $\Omega$
R4	330 $\Omega$
R6	22 $\Omega$
R7	1 k $\Omega$
R8	10 k $\Omega$
C1	3,3 nF 3 kV
C2 – C4	10 nF (C2 3 kV) 100 V
L1	1 $\mu$ H
T1	Pulssimuuntaja 1:1, (n. 2 $\mu$ H : 2 $\mu$ H)
P1, P2	BNC-liitin
U1A	Puskuri (ei vielä määritelty)
SW1	Painonappi
SW2	Kaksiasentoinen kytkin

Puskuripiiri U1A, ei ole vielä määritelty, koska signaaligeneraattorihjauksen tarve ei vielä ollut kriittinen. Tällä hetkellä tärkein ominaisuus on yksittäiset pulssit, joiden amplitudi on riittävän tarkka luotettaviin toistoihin.

Kondensaattori C4 on pienempi kuin alun perin, koska ohjauksen jännite nostettiin samalle tasolle kuin liipaistava jännite.

Suodatinkytken kelan L1 arvoa ei ole varmistettu käytännön testeillä. Kelan laskettu induktanssi on todennäköisesti lähempänä  $2.7 \mu\text{H}$ , kuin teoriassa ja simuloinnissa käytettyä  $1 \mu\text{H}$  arvoa.

Pulssimuuntaja T1 käämien induktanssit täytyy vielä tarkistaa, koska testeissä pulssimuuntajan käämit on laskettu  $A_L$  luvun perusteella, ja ne ovat huomattavasti suuremmat kuin olisi tarvetta. Tämä saattaa vaikuttaa toimintanopeuteen. Käytännön testeissä induktanssi on ollut todennäköisesti lähempänä  $5 \mu\text{H}$  kuin simuloinnissa käytettyä  $2.7 \mu\text{H}$ .

Käytännön testissä vastus R6 oli arvoltaan  $10 \Omega$  ja tähän se on korjattu simuloinnin perusteella  $22 \Omega$ . Tämä täytyy vielä varmistaa käytännön testissä.

Kytkimelle lisättiin RC-suodatin, jonka tarkoitus on vähentää kytkimen aiheuttamaa värähtelyä. Suodatinkytken mitoitus pitää vielä tarkentaa.